



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위심사논문

단상 교류와 연결된 직류 배전 시스템의 DBS
마스터-슬레이브 제어 기반 계층 구조 제어 연구

Master-Slave Based Hierarchical Control for a
Single Phase Grid Connected DC Distributed
System with an ESS

2016 년 12 월

서울대학교 대학원

전기 · 컴퓨터공학부

이 승 운

단상 교류와 연결된 직류 배전 시스템의 DBS 마스터

슬레이브 제어 기반 계층 구조 제어 연구

지도 교수 조 보 형

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2016 년 12 월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터공학부

이 승 운

이승운의 공학박사 학위논문을 인준함

2016 년 12 월

위 원 장 설 승 기 (인)

부위원장 조 보 형 (인)

위 원 하 정 익 (인)

위 원 원 충 연 (인)

위 원 채 수 용 (인)

초 록

최근 환경 문제의 대두로 인해 전기 에너지의 효율적인 사용 및 신 재생 에너지의 사용에 대한 요구가 늘고 있으며 이 신 재생 에너지의 운용에 있어 높은 신뢰성을 얻기 위해 분산 발전 시스템과 에너지 저장 장치에 대한 관심이 고조되고 있다. 이를 효과적으로 통합하고 운영하기 위해 다양한 구조 및 형태의 분산 발전 시스템이 연구되고 있는데 이 중에서 태양광과 배터리를 이용한 직류 배전 시스템은 에너지 변환 과정의 간소화 및 배전 선로의 신뢰성 향상 등의 장점에 힘입어 소규모 분산 발전 시스템에서 교류 배전 시스템의 대안으로 관심을 받고 있다.

직류 배전에 시스템에 대한 연구는 통합 시스템의 설계, 구축, 운용 등 다양한 분야에서 진행되어 왔지만 각 하위 시스템을 최종적으로 통합하는데 있어서 주로 드롭 제어를 사용되어 왔는데, 이 제어 방식은 통신 독립성과 시스템의 확장 용이성을 통해 다양한 시스템과 구조에서 사용되어 왔다. 하지만 드롭 제어 방식은 드롭 이득 값이 직접적으로 시스템의 소신호 모델링에 참여되어 출력 임피던스가 증가하는 문제가 있었고, 이에 따라 안정적인 설계 및 동특성 등에 있어 단점을 지적받아 왔다.

본 논문에서는 마스터-슬레이브 제어를 기반으로 하는 계층 제어 구조를 제안하고 이를 이용해 직류 배전 시스템을 운용하는 방식에 대해 논하도록 한다. 기존의 마스터-슬레이브 제어는 에너지 흐름 및 전력을 관리하기 편하다는 장점이 있지만, 통신에 대한 의존성이 커서 통신

지연이나 단락등의 사고가 발생 했을 경우의 문제가 강하게 지적되어 왔으며, 또한 계층 구조가 제안된 이후 에너지 관리 등의 기능이 상위 제어기에 관리되면서 드롭 제어에 밀려 소규모 분산 전원 시스템을 제외하면 사용이 드물어 졌다. 하지만 본 논문은 통신과 독립된 마스터-슬레이브 제어 방식을 제안하고 이를 통해 계층 제어 구조의 하위 제어기를 구성함으로써 기존 드롭 제어를 기반으로 하는 시스템보다 안정적이고 빠른 동특성을 갖는 시스템을 얻는다. 해당 제어 방식은 기존 마스터-슬레이브 제어 또는 중앙 집중형 제어 방식의 가장 큰 단점이었던 낮은 확장성 및 통신 지연 혹은 단락 사고로 인한 시스템 문제를 상당량 해결 할 수 있으며, 해당 운용 방안으로 인해 발생하는 특징 및 문제점에 대해 고려하고 이를 해결하기 위한 방안 역시 논의한다.

또한 기존 운용 방법과 제안한 운용 방법의 비교를 통해 제안한 방법에서 배전 선로 임피던스의 크기가 얼마나 줄어드는지를 분석하였으며 이를 검증하기 위해 Matlab과 PSIM을 기반으로 한 소프트웨어 테스트베드를 만들어 확인하였으며 하드웨어 장치를 구축하여 제안한 시스템의 안정적인 동작과 운용 알고리즘을 실험적으로 검증하였다.

주요어 : 직류 배전 시스템, 에너지 저장 장치, 분산 전원 시스템, 소신호 모델링, 마스터-슬레이브 제어

학 번 : 2008-22948

목 차

공학박사 학위심사논문	1
초 록.....	i
기호 및 약어.....	xiii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경.....	1
1.2 연구의 목적 및 범위.....	10
1.3 논문의 구성	12
제 2 장 소규모 직류 배전 시스템의 구성 및 동작 원리.....	13
2.1 소규모 직류 배전 시스템의 구성	13
2.1.1 중앙 집중형 제어 방법	15
2.1.2 독립 제어 방법에 따른 시스템 특징.....	17
2.1.3 하이브리드 제어 방법에 따른 시스템 특징	21
2.1.4 기존 제어 방법의 장 단점 비교.....	23
2.2 제안하는 제어 방식의 동작 개요.....	32
2.2.1 제어 방식 개요.....	34
2.2.2 하위 제어기	38
2.2.3 상위 제어기	44
제 3 장 하위 시스템 설계 및 분석.....	45

3.1 개별 제어기의 동작 원리.....	45
3.1.1 RIU의 특징.....	47
3.1.2 GIU의 특징.....	47
3.1.3 SIU의 특징.....	48
3.2 개별 요소의 소신호 분석 및 제어기 설계.....	54
3.2.1 RIU.....	55
3.2.2 GIU.....	64
3.2.3 SIU.....	73
제 4 장 제안한 운용 방안의 안정도 판별 및 과도 특성 해석.....	80
4.1 제안한 시스템의 안정도 해석.....	80
4.1.1 안정도 판별법.....	80
4.1.2 배전 선로 임피던스.....	83
4.1.3 출력 임피던스 분석.....	87
4.1.4 모의 실험 결과.....	94
4.2 DBS 마스터-슬레이브 동작 확인.....	113
4.2.1 하위 제어기의 구성 및 외부 지령치.....	113
4.2.2 슬레이브 커브 디자인 및 기준점 변동.....	115
4.2.3 DBS 마스터-슬레이브 커브에 기반한 모의 실험 결과.....	117
제 5 장 실험 및 결과.....	128
5.1 실험 세트 구성.....	128
5.2 통합 회로 동작.....	130

제 6 장 결론 및 향후 과제	136
6.1 결론	136
6.2 향후 과제	137
참고문헌.....	139
Abstract.....	156
감사의 글	159

표 목차

표 2.1 소신호 전달 함수 정의.....	19
표 2.2 제어 방법 별 특징 비교.....	23
표 3.1 사용한 배터리 1-cell당 상세 사양.....	53
표 3.2 RIU의 각 소자 및 전원 특성.....	55
표 3.3 GIU 각 소자 특성.....	64
표 3.4 SIU의 소자와 전원 특성.....	73
표 4.1 설계된 각 하위 시스템의 상세 정보.....	95
표 5.1 실험 세트 장비 구성.....	128

그림 목차

그림 1.1 전 세계 태양광 에너지 사용량 통계[6].....	2
그림 1.2 독일의 신 재생 에너지 발전 현황[9].....	3
그림 1.3 교류 배전(좌)와 직류 배전(우) 의 개략도.....	4
그림 1.4 분산 발전 시스템의 계층 구조 구성[29].....	6
그림 1.5 드롭 제어의 기본 개념 : (a) 시스템 구조, (b) 드롭 곡선.....	7
그림 1.6 드롭 이득과 시스템 안정성 판별을 위한 연구 일례: (a) Nyquist 판별 법[42]과 (b) Root Locus분석[45].....	9
그림 2.1 직류 기반 배전 시스템.....	13
그림 2.2 중앙 제어 방법의 블록도.....	15
그림 2.3 독립 제어 방법의 블록도.....	17
그림 2.4 드롭 제어 방식의 전압-전력 특성 곡선.....	18
그림 2.5 드롭 제어가 적용된 전력 변환 회로의 소신호 블록도.....	19
그림 2.6 드롭 이득에 따른 출력 임피던스 제한 예시.....	20
그림 2.7 계층 제어 방법의 블록도.....	21
그림 2.8 일반적인 전력변환 회로의 이중 루프 제어 구조도.....	24
그림 2.9 일반적인 부스트 컨버터의 출력 임피던스 보드 선도.....	25
그림 2.10 드롭 제어 방식에서의 출력 임피던스 보드 선도.....	26
그림 2.11 드롭 제어가 포함된 시스템의 출력 임피던스.....	27
그림 2.12 필터가 포함된 드롭 제어 시스템의 소신호 블록도.....	29
그림 2.13 사용된 필터 예시.....	30

그림 2.14 필터가 포함된 드롭 제어 시스템의 출력 임피던스 예시.....	30
그림 2.15 직류 배전 시스템의 간략화한 (a) 구조도와 (b) 마스터-슬레이브 형태로 변환한 개략도.....	32
그림 2.16 DC Bus Signaling방식의 의 개념도[73].....	33
그림 2.17 제안한 제어 방식의 운영 전략 플로우-차트.....	35
그림 2.18 제안한 제어 방식의 구조 개략도.....	36
그림 2.19 기존 자율 제어 방식에서 각 하위 시스템의 동작 구분	37
그림 2.20 간략화한 DBS 마스터-슬레이브 곡선.....	39
그림 2.21 DBS 마스터-슬레이브 곡선 변형.....	40
그림 2.22 두 개의 다른 특성을 가진 제어형 슬레이브를 포함한 시스템의 DBS 커브 예시.....	42
그림 2.23 중앙 제어기의 개념 및 동작	44
그림 3.1 제안한 시스템 상세 구성도.....	46
그림 3.2 GIU의 기본 동작 개념.....	48
그림 3.3 배터리의 전기적 등가 모델.....	49
그림 3.4 저장 장치 입 출력 전류 형태.....	50
그림 3.5 GIU와 SIU의 인덕터 전류 모의 실험 파형.....	51
그림 3.6 배터리와 슈퍼-커패시터 연동 구조.....	52
그림 3.7 슈퍼-커패시터의 1차 필터 개념도.....	52
그림 3.8 출력 단에 전해 캐패시터를 사용한 경우의 모의 실험 결과.....	54
그림 3.9 태양광용 부스트 전력 변환 회로.....	56
그림 3.10 MPPT 동작 상황에서 RIU의 등가 회로.....	57

그림 3.11 RIU의 MPPT 제어 시 소신호 블록도.....	59
그림 3.12 태양광 패널의 특성 곡선.....	60
그림 3.13 태양광 패널이 연결된 RIU의 소신호 블록도.....	60
그림 3.14 태양광 패널이 연결된 RIU의 간략화한 소신호 블록도.....	61
그림 3.15 RIU의 전류 루프 보드 선도.....	62
그림 3.16 RIU의 전압 루프 보드 선도.....	63
그림 3.17 교류 계통과 연계를 위한 단상 풀 브릿지 회로.....	65
그림 3.18 정상 동작 모드에서 GIU의 소신호 블록 다이어그램.....	67
그림 3.19 GIU의 전류 루프 보드 선도.....	68
그림 3.20 드롭 제어를 포함한 소신호 블록 다이어그램.....	69
그림 3.21 GIU 드롭 제어 시 전압 제어 루프 보드 선도.....	70
그림 3.22 다중화기 및 GIU 제어기 동작 개념도	71
그림 3.23 DBS 마스터-슬레이브 제어가 적용된 GIU의 기본 동작 모의 실험 파형.....	72
그림 3.24 저장 장치용 동기 부스트 컨버터 회로.....	74
그림 3.25 SIU의 등가 모델 회로.....	74
그림 3.26 SIU의 소신호 블록도.....	76
그림 3.27 SIU 전류 루프의 보드 선도	77
그림 3.28 SIU 전압 루프의 보드 선도	78
그림 3.29 SIU의 제어기 구성 블록도.....	79
그림 3.30 DBS 마스터-슬레이브가 적용된 SIU의 모의 실험 파형	79
그림 4.1 직렬 연결된 두 하위 시스템	81

그림 4.2 입출력 임피던스 보드 선도와 나이키스트 선도의 예시.....	82
그림 4.3 두 전력 변환 회로 사이의 π -링크 모델.....	83
그림 4.4 배전 선로 임피던스가 포함된 직류 배전 시스템의 블록도.....	86
그림 4.5 MPPT 동작 모드에서 RIU의 소신호 블록도.....	87
그림 4.6 RIU의 출력 임피던스 보드 선도.....	89
그림 4.7 GIU의 동작 모드에 따른 GIU의 임피던스 보드 선도.....	91
그림 4.8 SIU의 동작 모드 별 출력 임피던스 보드 선도.....	93
그림 4.9 정전력 부하의 임피던스 보드선도.....	94
그림 4.10 각 전력 변환 회로 및 부하의 임피던스 보드 선도.....	96
그림 4.11 등가화한 버스 임피던스의 나이키스트 경로.....	97
그림 4.12 부하 변동에 따른 모의 실험 결과.....	98
그림 4.13 배전 선로 임피던스를 포함한 임피던스 보드 선도.....	99
그림 4.14 배전 선로 임피던스를 포함한 나이키스트 경로.....	100
그림 4.15 배전 선로 임피던스를 포함한 부하 변동 시 모의 실험 결과.....	101
그림 4.16 드롭 제어시 임피던스 보드 선도.....	102
그림 4.17 드롭 제어시 나이키스트 경로.....	102
그림 4.18 드롭 제어 시 부하 변동에 대한 모의 실험 파형.....	103
그림 4.19 사고 상황시 드롭 제어 전환 모의 실험 파형.....	104
그림 4.20 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어의 안정도 비교.....	105
그림 4.21 R_d 가 2일 때 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어 안정성 비교.....	106
그림 4.22 전압 제어 대역폭이 다른 두 컨버터의 출력 임피던스 비교.....	108
그림 4.23 드롭 제어시 출력 임피던스 비교.....	109

그림 4.24 드롭 제어 시 순간 변동 부하에 대한 모의 실험 결과.....	110
그림 4.25 드롭 제어 시 과도 상태 출력 전압 특성	111
그림 4.26 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어시 지속적인 변동 부하에 대한 모의 실험 결과	111
그림 4.27 상위 제어기의 외부 지령치를 포함한 DBS 마스터-슬레이브 제어 의 하위 제어기 개략도.....	113
그림 4.28 전압 회복 개념도	114
그림 4.29 전압 회복을 적용한 모의 실험 결과.....	115
그림 4.30 슬레이브 DBS 커브의 예	116
그림 4.31 DBS 마스터-슬레이브 상위 제어기 지령치 변경 개념도.....	117
그림 4.32 순간 부하 변동 후 정상상태 모의 실험 결과.....	119
그림 4.33 주기적인 부하 변동에 대한 모의 실험 결과 (1).....	121
그림 4.34 주기적 부하 변동에 대한 모의 실험 결과 (2).....	122
그림 4.35 각 월별 부하 프로파일	123
그림 4.36 모의 실험에 사용한 태양광 발전 프로파일 및 부하 프로파일.....	124
그림 4.37 실제 부하 및 신 재생 발전 프로파일에 따른 모의 실험 결과.....	125
그림 4.38 전압 회복을 추가한 DBS 마스터-슬레이브 시스템의 모의 실험 동 작.....	126
그림 4.39 K_s 값에 따른 전류 분배 비교.....	127
그림 5.1 실험 세트 구성 블록도.....	128
그림 5.2 실험 세트.....	129
그림 5.3 부하 변동에 대한 통합 실험 결과.....	130

그림 5.4 DBS마스터-슬레이브 제어 시 배전 선로 임피던스.....	131
그림 5.5 SoC 변동에 대한 실험 결과.....	132
그림 5.6 전압 회복 기능이 포함된 경우 실험 결과.....	133
그림 5.7 장 시간 DBS 동작에 대한 실험 파형.....	134
그림 5.8 마스터 사고 상황 시 동작 변환 실험 파형.....	135

기호 및 약어

GIU	Grid Interface Unit
RIU	Renewable Interface Unit
SIU	Storage Interface Unit
v_g	Input voltage
v_o	Output voltage
i_L	Inductor current
i_{L_SIU}	Inductor current of SIU
i_{L_GIU}	Inductor current of GIU
i_{L_RIU}	Inductor current of RIU
i_{SIU}	Output current of SIU
i_{GIU}	Output current of GIU
i_{RIU}	Output current of RIU
i_{Load}	Load current
P_{SIU}	Power transfers from storage device to bus
P_{RIU}	Power transfers from renewable energy source to bus
P_{GIU}	Power transfers from utility grid to bus
P_{Load}	Total load power
R_d	Droop gain
G_{vg}	Small signal transfer function of input voltage to output voltage
G_{ig}	Small signal transfer function of input voltage to inductor current

G_{vi}	Small signal transfer function of output current to output voltage
G_{ii}	Small signal transfer function of output current to inductor current
G_{id}	Small signal transfer function of duty to inductor current
G_{vd}	Small signal transfer function of duty to output voltage
H_i	Transfer function of current controller
H_v	Transfer function of voltage controller
T_i	Current loop gain
T_v	Voltage loop gain
Z_o	Output impedance
Z_{o_SIU}	Output impedance of SIU
Z_{o_RIU}	Output impedance of RIU
Z_{o_GIU}	Output impedance of GIU
K_m	Master coefficient of DBS master curve
K_s	Slave coefficient of DBS slave curve
SoC	State-of-Charge
MPPT	Maximum power point tracking
OCV	Open circuit voltage of battery
$C_{battery}$	Main capacitance of battery
R_i	Inner leakage resistance of battery
R_{diff}	Diffusion resistance of battery
C_{diff}	Diffusion capacitance of battery
DBS	DC bus signaling

V_{Bus}	Bus voltage
P_{slave}	Total output power of all slave units
V_B	Battery output voltage
V_{ext}	External voltage reference from central controller to master unit
I_{ext}	External current reference from central controller to slave unit
EMS	Energy Management Strategy

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

지속적인 경제 발전과 기술발전에 따른 에너지 사용량 증가, 그리고 환경 보호에 대한 관심은 신 재생 에너지에 대한 수요를 증가시키고 있으며, 이를 운용하기 위한 소규모 분산 발전 시스템과 저장장치의 운용에 대한 요구를 만들어 내고 있다. 분산 발전 시스템은 기존의 대규모 발전소를 통해 광범위한 영역에 에너지를 공급하는 중앙 집중형 공급 방식과는 다르게 여러 개의 소규모 에너지를 조립해 부하에 공급하는데 이러한 전원의 다양화를 통해 시스템의 신뢰성 향상 및 에너지 불균형 해소 등의 장점을 가지고 있으며, 또한 장거리 에너지 송전 및 배전을 줄이고 근접한 에너지를 사용하여 장거리 송전에 따른 손실을 감소 및 발전소에 걸리는 최대 부하 감소 등 기존 중앙 집중형 공급망에도 도움을 주고 있다[14]. 그 밖에도 여러 전원들을 통제하기 위한 개별 전력 변환기의 적용을 통해 사고 시 빠른 차단[5] 및 개별적인 에너지 사용 방식 관리 등의 서비스 제공이 가능하기 때문에 더 효율적인 에너지 사용이 가능하다는 면에서도 주목 받고 있다.

이러한 신 재생 에너지 사용의 증가는 환경적인 요인 외에도 정책적인 요인들 역시 포함되어 있는데[6], 이 때문에 유럽 등지에서는 신 재생 에너지의 보급을 증가 추세가 매우 가파르다[7, 8]. 이 중에서도 설치의 용이성 및 주변 환경에 미치는 영향이 상대적으로 적은 태양광 에너지의

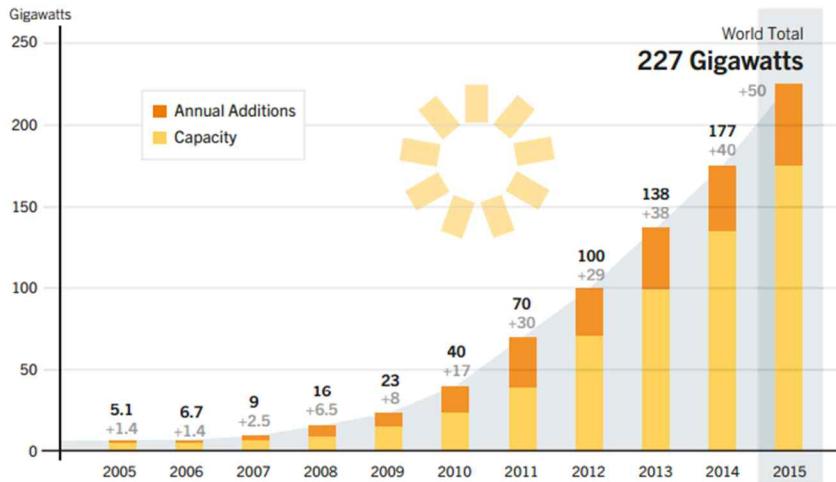


그림 1.1 전 세계 태양광 에너지 사용량 통계[6]

사용은 그림 1.1의 태양광 에너지 사용량 통계에서 볼 수 있듯이 매우 두드러진다. 태양광 설치 및 사용량은 해가 지날수록 점점 급격하게 증가하고 있으며, 2015년에는 이미 230 GW에 달하는 양을 공급하고 있다.

특히 독일의 경우 그림 1.2통계에서 볼 수 있듯이 신재생 에너지의 사용 비율이 매우 높은데[9], 2012년 이미 총 에너지 사용량의 30% 이상을 신재생 에너지의 의존하고 있으며, 이중 약 70~75% 정도를 태양광 에너지가 차지하였다. 하지만 독일의 경우 그림 1.1에서의 태양광 에너지 사용량 증가 추세와는 다르게 2012년 이후 추가적인 태양광 증가 비율이 매우 낮아지게 되는데 이에 대한 이유는 다음과 같다.

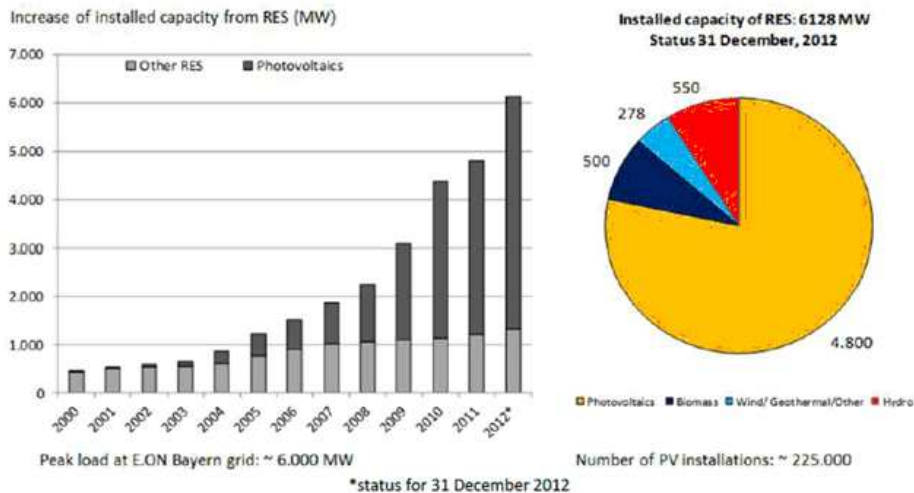


그림 1.2 독일의 신 재생 에너지 발전 현황[9]

신 재생 에너지 사용의 증가는 반대로 계통 품질에 문제를 일으키기 시작했는데, 대부분의 신 재생 에너지는 발전량의 예측 및 제어가 힘든 관계로 발전량이 전체 에너지의 일정 부분을 넘어설 경우 계통 전압 및 주파수에 악영향을 미친다. 이를 방지하기 위해 여러 정책들이 생겨났으며, Grid-Lock 개념 역시 마찬가지이다[10]. Grid-Lock은 신 재생 에너지 발전을 통해 생겨난 에너지를 전부 분산 발전 망 내에서 사용하기를 권장하여 외부 망에 대한 영향을 최소화 시키고자 하는 것인데, 이로 인해 신 재생 발전을 부하와 직접적으로 엮는 분산 소규모 분산 발전 시스템의 필요성이 더욱 커지고 있으며, 또한 주변 환경에 따라 발전량이 크게 좌우되는 신 재생 에너지와 부하간에 에너지 공급 및 사용의 평형을 맞추기 위해서는 그 완충 작용을 하는 저장 장치의 필요성이 매우 커지고 있다[11-14]. 현재 신 재생 발전 에너지원들 중 가장 큰 비중을 차지하고

있는 태양광의 경우 전체 발전량이 4-6시간 사이에 몰려있으며, 저장 장치가 없을 경우 결국 이 발전 시간 동안은 에너지를 계통에 공급하고 나머지 시간 동안 에너지를 공급 받는 형태로 동작해야 한다. 이는 결국 신재생 발전 에너지가 계통에 영향을 미칠 수 밖에 없는 상황으로 Grid-Lock 개념에 위배되기 때문에 해당 개념을 만족시키기 위해서는 저장 장치의 사용이 필수적이라고 할 수 있다. 더불어 의료 시설 및 군 시설 등 무 정전 시스템이 필요한 특수목적용 시스템에서도 분산 전원 시스템 및 저장 장치의 사용이 늘어나고 있으며, 이들은 Uninterruptable power supply(UPS)와 같은 저장 장치의 사용을 필수적으로 요구 하고 있다[15-17].

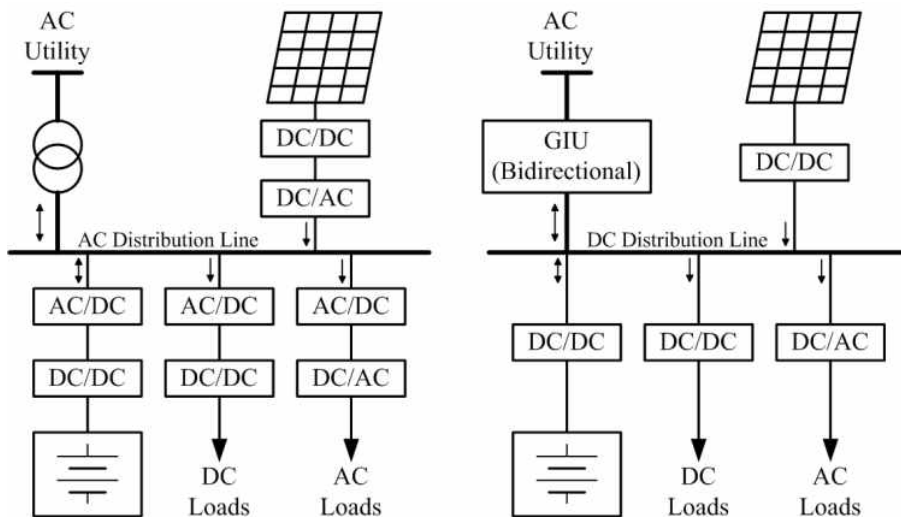


그림 1.3 교류 배전(좌)와 직류 배전(우) 의 개략도

태양광 에너지와 저장 장치의 필요성 증가, 그리고 점점 증가하는 직류 부하들의 사용으로 인해 직류 배전 시스템에 대한 연구가 생겨났는데, 직류 배전 시스템은 그림 1.3에서처럼 직류 전압의 형태를 띄는 태양광 및 저장 장치의 운용 및 제어에 용이하며 또한 에너지 전달 경로를 간소화시킬 수 있어 소규모 분산 발전 시스템의 효율성 및 신뢰성 향상 등의 장점을 갖고 있어 여러 분야에서 적용이 되거나 적용이 논의되고 있다[18-23].

현재 직류 배전 시스템은 우선적으로 데이터 센터, 선박, 의료 시설, 그리고 군 시설 등의 특수 목적용 시설에 우선 연구 및 적용되고 있으며, 공장이나 가정용으로 일반화를 위한 노력이 진행 중이다[24-28]. 하지만 기존의 교류 배전 시스템에서 사용되던 기술 및 규정을 직류 배전에 바로 적용하기에는 두 시스템의 성격이 상이하며, 또한 적용을 위한 대상이 다른 만큼 직류 배전의 활용을 위해서는 우선적으로 새로운 표준화 규정의 확립, 그리고 안전성 확보 등을 위한 연구가 필요한 실정이다. 이를 위해 시스템 표준화를 위한 연구나 논의[29, 30], 배전 선로 품질에 대한 정의 및 연구[31, 32], 시스템 안정성 확보[33-35], 그리고 안전을 위한 독립 운전[36, 37], 단락 사고, 아크 사고[38] 등의 검출 및 상황 대처에 대한 여러 연구들이 개별적으로, 그리고 통합되어 진행되고 있다.

소규모 분산 발전 시스템의 제어 및 운용 표준화에 대한 연구는 주로 ANSI/ISA-05와 같은 국제 표준 규정에 기반하여 진행되고 있으며, 이를 만족시키기 위해 계층 구조형 제어 전략이 관심을 받고 있다[29, 39]. 이 방식은 그림 1.4 및 아래의 각 제어 레벨 별 설명과 같이 계층에 따라

각각의 역할을 구분한다. 하위 계층은 각 회로의 안정적인 동작을 담당하며, 상위 계층으로 갈수록 부가적인 기능을 담당한다. 일반적으로 상위 계층으로 갈수록 제어 대역폭이 낮아지며, 각자 연결되어 있는 계층과 통신을 통해 지령을 공유 가능하며, 하위 계층은 상위 계층에 문제가 생겨도 안정성을 유지하는 것을 목표로 한다.



그림 1.4 분산 발전 시스템의 계층 구조 구성[29]

1) Level 1 (Primary Control)

본래는 각 회로의 소자 및 이들의 제어 루프를 의미하는 Level 0가 따로 있지만 본 논문에서는 Level 1에 포함시키도록 한다. Level 1에서는 각 하위 시스템들의 제어 루프와 이들이 묶인 시스템의 안정적인 동작을 기반으로 한다. 각 병렬 에너지원들 및 이들을 제어하는 회로들의 기본 동작 및 각 보호 회로들을 포함하며, 드롭 제어와 같은 병렬 제어 개념까지를 포함한다.

2) Level 2 (Secondary Control)

Level 2에서는 분산 전원 시스템과 외부 망 사이의 관계를 관리하는데 따라서 독립 운전 상황 검출 및 그에 따른 처리, 그리고 외부 망과의

동기화 등을 포함한다.

3) Level 3 (Tertiary Control)

Level 3은 분산 에너지원들의 효과적인 운용 등을 관리하는 단계로 시스템의 직접적인 안정성이나 동작과 무관하게 운용 전략만을 담당한다.

시스템 안정성의 확보를 위해 하위 계층의 제어는 상위 계층과의 연계와 무관하게 동작 및 안정성을 확보하는 것을 목표로 하는데, 이에 따라 드롭 제어의 사용이 대중화 되고 있다. 드롭 제어는 원래 여러 병렬 회로들의 전류 분배를 위한 방식으로 그림 1.5와 같이 각 회로의 출력 전류를 가상 저항 혹은 센싱 이득인 R_d 를 이용하여 출력 전압 지령치를 변경시키는 것으로 각 모듈의 전류 분배량을 쉽게 변동시킬 수 있는데, 이로 인해 통신 독립성과 높은 확장성에서의 장점을 인정받아 하위 계층 통합 제어 방식으로 널리 사용되고 있다.

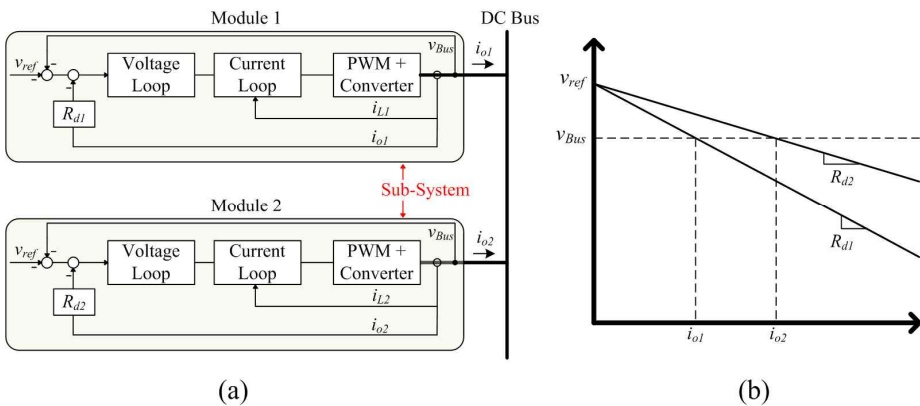


그림 1.5 드롭 제어의 기본 개념 : (a) 시스템 구조, (b) 드롭 곡선

드롭 제어의 사용이 늘어나면서 분산 제어 시스템에 드롭을 사용했을 때의 특성 및 안정성에 대한 연구가 중요해 지기 시작 했는데, 이들 중에서 특히 드롭 이득 크기에 따른 분산 전원 시스템의 안정성 연구[40-45] 및 배전 선로 임피던스의 변화[46] 그리고 이로 인한 동특성 변화 및 배전 선로 전압 안정화에 대한 연구[47-50] 역시 새로이 이루어지고 있다. 출력 전류와 드롭 이득 값이 각 모듈의 소신호 모델에 추가 되는 만큼 해당 연구는 분산 전원 시스템의 사용에 있어 필수적이다.

분산 전원 시스템 안정성의 연구는 주로 임피던스에 대한 분석을 통해 이루어진다. 배전 선로에 연결된 각종 분산 전원 및 이들을 제어하는 전력 변환 회로들의 출력 임피던스와 부하와 부하의 입력에 연결된 입력 필터를 포함한 입력 임피던스를 비교하여 각종 외란에 대해 전원과 부하 간에 간섭이 발생하는지를 확인하는데, 분산 전원은 계통과는 다르게 용량이 한정적이기 때문에 출력 임피던스가 제한되어 있어 부하의 구성에 따라 간섭이 일어날 경우가 존재하며, 드롭 이득이 가상 저항의 역할을 하여 임피던스가 추가로 상승하게 되는 드롭 제어의 경우 부하와의 간섭을 배제하는 것이 더 힘들어 진다.

그림 1.6는 이러한 연구들의 일례로서 각각 드롭 제어로 묶인 시스템에서 드롭 이득과 시스템의 제어 안정성을 판별하기 위한 연구 결과이다. 해당 연구들은 각 회로들을 안정적으로 설계한 상황에서 드롭 제어로 시스템을 엮었을 경우의 배전 선로 안정성을 판별하는데, 나이키스트 판별법을 사용한 (a)의 경우[42]와 루트-로커스 판별법을 사용한 (b)의 연구 결과[45] 모두 R_d 의 증가에 의해 안전 영역에서

벗어나는 모습을 보여준다. 또한 드롭 이득으로 인한 배전 선로 임피던스의 증가는 시스템의 동 특성에도 역시 악영향을 미치기 때문에 배전 선로 전압 및 동특성 확보를 위해 추가 회로[51] 또는 기법[52, 53]등에 대한 연구가 진행되었다. 하지만 추가 회로 사용의 경우 직류 배전의 장점 중 하나인 에너지 전송 경로 간소화를 통한 효율 증가에 위배되며, 추가 기법을 사용하더라도 드롭 이득으로 인한 배전 선로 임피던스 제한의 영향을 줄일 수 있을 뿐, 없애는 것은 불가능하며, 또한 특정 주파수에서는 오히려 공진이 발생해 임피던스가 더 증가하는 현상이 발생 할 수 있어, 안정적인 시스템 설계와 배전 선로 전압 제어를 위해서는 새로운 연구가 필요하다.

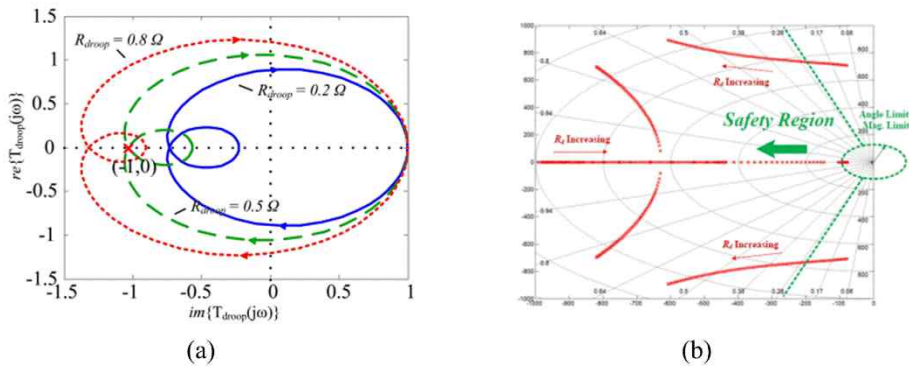


그림 1.6 드롭 이득과 시스템 안정성 판별을 위한 연구 일례: (a) Nyquist 판별
법[42]과 (b) Root Locus분석[45]

1.2 연구의 목적 및 범위

본 논문은 에너지 저장장치를 포함하는 소규모 직류 배전 시스템의 기존 운용 방법과, 그에 따른 배전 선로 품질과 관련된 각종 설계에 대해 분석하고, 시스템 유지 및 버스 전압 안정화를 위한 새로운 시스템 운용 방법을 제시한다. 제안한 운용 방안은 추가적인 회로의 구성 없이 배전 선로의 전압을 안정화 시키고, 임피던스를 줄여 안정적인 시스템 설계를 목적으로 하며, 이를 위해 마스터-슬레이브 제어를 기반으로 하는 계층 구조 제어 방식을 사용한다. 해당 마스터-슬레이브 제어 방식은 드롭 제어와 유사하게 버스 전압을 변동시켜 각 슬레이브에 전력 분배 정보를 전달하고, 이를 통신 연결 없이도 저장 장치의 에너지량과 슬레이브 회로들의 출력 전류를 유지 가능하며, 이 위에 각 분산 전원들의 사용 에너지를 예측 및 관리하는 중앙 제어기를 통해 좀 더 능동적인 관리를 목표로 한다. 기반을 담당하는 로컬 마스터-슬레이브 제어기가 통신에 무관하게 시스템을 운용 할 수 있기 때문에 중앙 제어기는 기존 계층 제어 구조와 마찬가지로 낮은 대역폭의 통신을 이용해도 충분하며, 통신 지연 및 단락 등에 대해서도 강인한 특성을 갖는다.

제안한 시스템의 기본적인 목표인 효율적인 에너지 운용이나 안정적인 전력 공급 유지 외에도 버스 전압의 동특성 면에서 장점을 얻을 수 있도록 하기 위해 높은 동작 주파수와 전압 제어 대역폭으로 설계 가능한 저장 장치를 마스터로 하며, 이에 따라 계통 연계나 독립 운전에 대한 운용을 따로 나눌 필요가 없이 정전과 같은 사고 상황에서도 저장 장치의

에너지가 모두 소진될 때까지 시스템이 자연스럽게 유지 되도록 한다.

제안한 시스템의 설계를 위해 각 하위 시스템(Sub-system)들의 소신호 분석 및 제어기 설계가 진행되며, 이에 따른 출력 임피던스 역시 구해 각 하위 시스템들의 상호 간섭을 피하고 배전 선로의 안정성 분석 역시 진행한다. 이에 대한 검증은 MATLAB과 PSIM 툴을 이용한 모의 실험을 통해 검증하며, 또한 하드웨어 시스템을 구축하고 다양한 조건에서의 실험 결과를 이용해 제안한 방식의 타당성을 검증한다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 기존 소규모 직류 배전 시스템의 운영 방식을 비교 분석하고, 제안하는 방식의 운용 방안을 소개한다.

3장에서는 제안한 운용 방안에 맞춰 각 하위 시스템들을 분석 및 설계한다.

4장에서는 3장에서 제안한 운용 방안 및 설계의 안정도를 판별하기 위한 안정도 해석 및 2장에서 설명한 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어의 설계 차이를 비교한다. 또한 제안한 운용 방법에서 상위 제어기를 구성하고 사용하기 위한 방법을 확인하고, 이를 모의 실험을 통해 확인한다.

5장에서 통합 실험 세트를 구성하고 실험을 진행하여 제안한 시스템의 운용과 그 타당성을 확인하며

6장에서 결론 및 향후 과제를 통해 마무리한다.

제 2 장 소규모 직류 배전 시스템의 구성 및 동작 원리

2.1 소규모 직류 배전 시스템의 구성

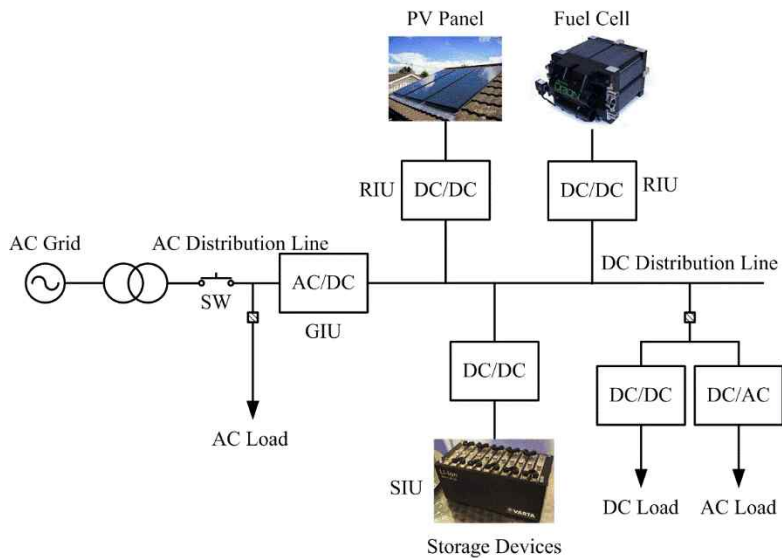


그림 2.1 직류 기반 배전 시스템

소규모 직류 배전 시스템은 일반적으로 신 재생 에너지와 에너지 저장 장치 그리고 이러한 분산 전원들과 직류 배전 선로 및 계통 사이의 전력 변환 회로를 통해 구성되는데, 이 장치들의 연결 및 구성에 따라 다양한 구조로 나뉠 수 있다. 그림 2.1은 가장 일반적으로 사용되는 직류 배전 시스템을 나타낸 것으로 각 하위 시스템(Sub-system)을 단일 모듈로 등가화 하여 나타낸다. 각 하위 시스템의 명칭에 대해 간단히 언급을 하고

넘어가자면 우선 Grid Interface Unit(GIU)은 외부 교류 계통과 내부 직류 배전 선로 사이의 전력 변환 장치로 기능에 따라 단 방향 혹은 양방향으로 구성되는 회로이며, Renewable Interface Unit(RIU)은 신 재생 에너지원과 직류 배전 선로 사이의 전력 변환 장치이며, Storage Interface Unit(SIU)은 에너지 저장장치와 배전 선로 사이의 양방향 전력 변환 장치를 의미한다.

전체 시스템의 안정도는 위의 각 하위 시스템을 안정적으로 설계한 후 출력 임피던스를 증가화시켜 Cho's 안정도 판별법[54, 55]과 Nyquist 판별법을 기반으로 안정성을 판별한다. 전체 시스템을 운용하기 위해서는 직류 배전 시스템을 운용하기 위한 기반 제어 방법을 결정할 필요성이 있으며 이 기반 제어 방법의 종류에 따라 각 하위 시스템의 설계 및 출력 임피던스가 달라지기 때문에 기반 제어 방법의 장 단점을 고려한 신중한 운용 방안 설계가 필요하다. 본 장의 나머지 각 절에서는 분산 전원 시스템 운용을 위한 기반 제어 방법들의 특징을 간략하게 살펴보고 제안하는 제어 및 운용 방식이 시스템의 운용 및 설계에 어떤 특징을 가지게 될 지 논의한다.

2.1.1 중앙 집중형 제어 방법

2.1.1.1 중앙 집중형 제어 방법의 특징

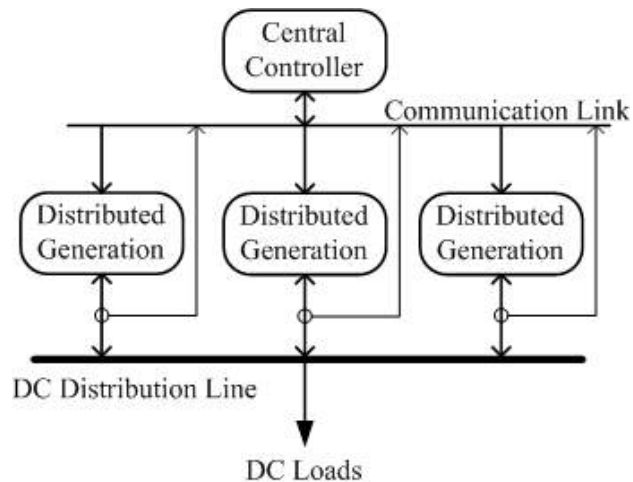


그림 2.2 중앙 제어 방법의 블록도

중앙 집중형 제어 방식은 그림 2.2에서 보이듯이 상위 제어기가 모니터링을 통해 분산 전원이나 에너지 저장 장치 등의 구성 요소의 정보를 수집하고 이를 바탕으로 에너지 관리 및 전력 분배 등을 결정하여 하위 제어기에 직접 명령을 내리는 방식이다[56]. 모든 제어 명령은 중앙 제어기에 의해 수행되며 따라서 통신의 사용이 필수적이다. 이 방법은 직접적으로 모든 정보를 수집하고 제어하기 때문에 효율적인 에너지 관리가 가능한데 특히 현재 수집된 정보를 바탕으로 비용 저감 혹은 수요 관리 등을 직접적으로 반영하여 제어 전략을 즉시 반영 할 수 있다는 장점이 있다[57, 58]. 하지만 동시에 상위 제어기나 통신에 문제가 발생할

경우 시스템 동작에 문제가 생길 수 있으며, 실제로는 분산 전원의 수가 늘어났을 경우 상위 제어기의 연산 부담에 대한 문제 및 시지연 문제, 그리고 제어 전략 변경 시 오작동에 대한 우려 등에 의해 주로 소규모 시스템에서 사용되고 있다[59, 60].

2.1.1.2 중앙 제어 방법의 배전 선로 특성

중앙 제어 방법은 하나의 제어기에서 전체 시스템을 통괄하고 있기 때문에 배전 선로의 특성이 중앙 제어기가 선택한 주 전압 제어 전력 변환 회로 특성에 따라 결정된다. 기존 중앙 제어 방법에서 RIU는 신재생 에너지의 최대 발전량을 얻기 위해 MPPT 동작을 수행하며, SIU는 보통 배터리의 CC-CV 충전 및 방전 역할을 수행하기 때문에 중앙 제어기는 일반적으로 외부 계통과 연결된 양방향 직류-교류 전력변환장치인 GIU를 통해 이루어진다[61]. GIU는 기본적으로 계통의 전류를 제어하여 역률 보상 기능을 동시에 행하기 때문에 전압 제어기의 대역폭이 입력 교류 전압의 주파수보다 낮아지며, 이로 인해 출력 임피던스가 큰 경향을 나타내기 때문에, 직류 배전 선로는 필연적으로 느린 동특성 및 큰 전압 리플을 가지게 된다. 해당 단점은 PR (Proportional Resonant) 제어 방식 등을 통해 해결 가능하지만, 본 논문에서는 여러 특성을 지닌 분산 전원 및 그에 따른 다양한 전력 변환 회로의 특성을 나타내고자 제어 대역폭이 크게 차이가 날 수 있도록 기본 PI제어만을 사용하도록 한다.

2.1.2 독립 제어 방법에 따른 시스템 특징

2.1.2.1 독립 제어 방법의 특징

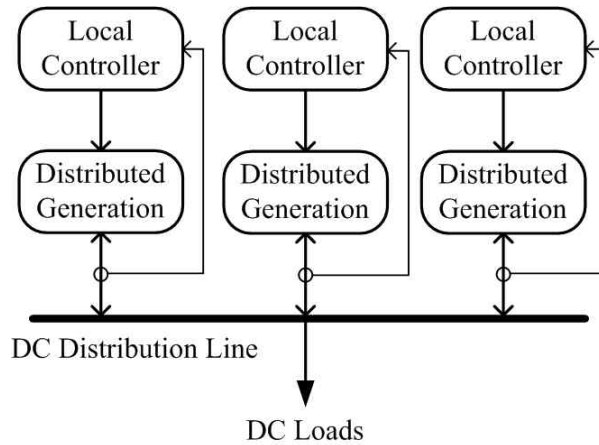


그림 2.3 독립 제어 방법의 블록도

그림 2.3은 통신 라인 없이 각 전원이 하위 제어기 특성에 따라 독립적으로 제어되는 독립 제어 방법을 나타낸다. 중앙 제어 방법과 달리 이 방법은 상위 제어기와 통신을 필요로 하지 않으며, 전력 분배를 위해 개별적으로 제어되기 때문에 각 전력 변환 회로의 모듈화가 가능하며, 높은 신뢰성 및 확장성을 장점으로 한다. 이 방식은 전력 분배를 위해 주로 드롭 방식의 제어를 적용하는데, 직류 배전 시스템에서는 각 전력 변환 회로가 공통으로 연결된 직류 배전 선로의 전압을 이용해 그림 2.4처럼 미리 정해놓은 드롭 이득에 따라 전력 분배를 한다[62, 63].

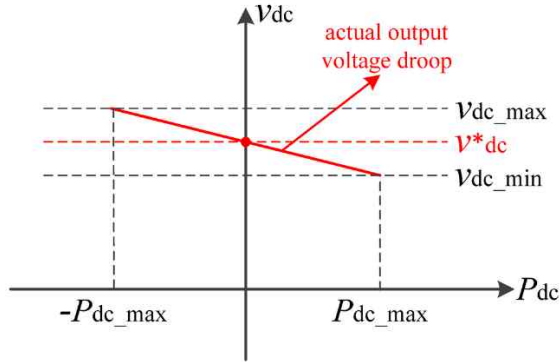


그림 2.4 드롭 제어 방식의 전압-전력 특성 곡선

하지만 이 제어 방식의 경우 정해진 드롭 이득으로 인해 신 재생 에너지 및 에너지 저장 장치의 효과적인 활용이 불가능하며, 직류 배전 선로의 임피던스가 드롭 이득에 의해 상승하면서 배전 선로 특성이 저하된다는 단점이 있다[64-66]. 이에 대한 자세한 설명은 수식적 분석과 함께 다음 절에서 상세하게 확인하도록 한다.

2.1.2.2 독립 제어 방법의 배전 선로 특성

드롭 제어를 기반으로 하는 독립 제어 방법은 통신 라인 없이 각 하위 시스템이 공통적으로 연결되어 있는 배전 선로의 전압 정보를 이용해 각 하위 시스템의 전력 분배를 진행한다. 이 방식은 일반적으로 각 전력 변환 회로의 출력 전류값에 드롭 이득을 곱해 전압 지령치에 반영하여 전력 분배를 하는데, 이 값이 출력 임피던스에 영향을 미쳐 배전 선로의 특성을 나쁘게 한다.

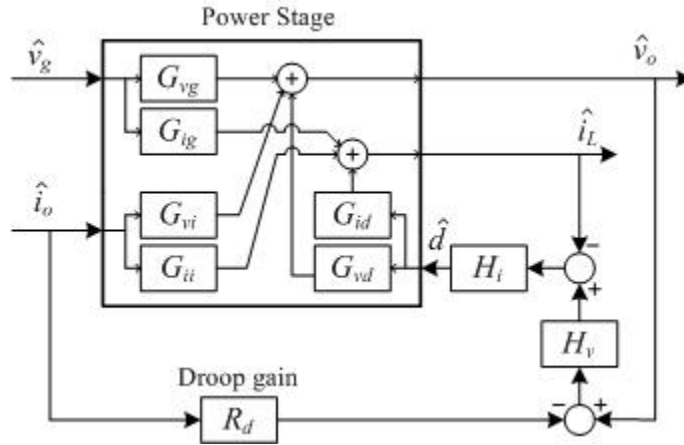


그림 2.5 드롭 제어가 적용된 전력 변환 회로의 소신호 블록도

표 2.1 소신호 전달 함수 정의

기호	비고
G_{vg}	Transfer function of input voltage(v_g) to output voltage(v_o)
G_{ig}	Transfer function of input voltage(v_g) to inductor current(i_L)
G_{vi}	Transfer function of output current(i_o) to output voltage(v_o)
G_{ii}	Transfer function of output current(i_o) to inductor current(i_L)
G_{vd}	Transfer function of duty(d) to output voltage(v_o)
G_{id}	Transfer function of duty(d) to inductor current(i_L)
H_i	Transfer function of current controller
H_v	Transfer function of voltage controller
R_d	Droop gain

그림 2.5는 드롭 제어가 적용된 전력 변환 회로의 소신호 블록도를 나타내며, 표 2.1은 각 전달 함수의 의미를 나타낸다. 소신호 블록도에서 나타난 바와 같이, 드롭 이득이 출력 전압 및 지령치에 직접적으로 영향을 미치는데, 이는 배전 선로의 부하 변동 등이 직접적으로 출력 전압에 영향을 미치기 때문에 배전 선로 전압의 변동 폭이 크며 따라서 하위 시스템들의 출력 임피던스 역시 드롭 이득에 의해 제한된다. 그림 2.6은 드롭 이득에 의해 부스트 전력 변환 회로의 출력 임피던스가 제한되는 모습을 나타낸다. 드롭 이득에 의해 저주파 대역에서의 임피던스가 제한되어 시스템의 동 특성이 감소하고, 부하 단의 저주파 필터 사용 시, 안정적인 시스템 설계에 문제가 발생할 가능성이 높아진다.

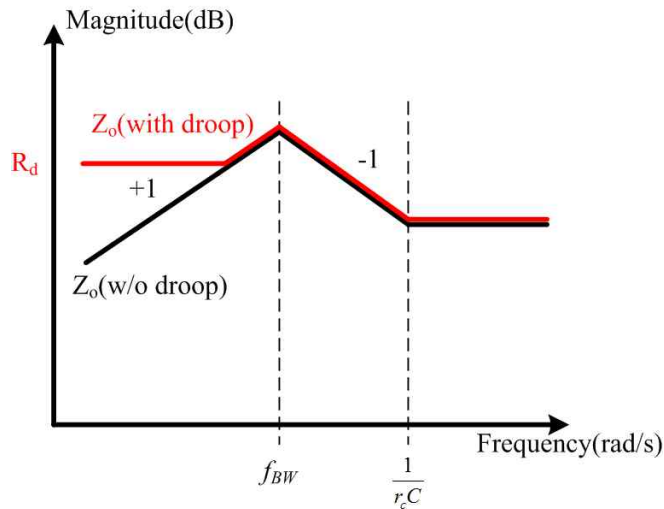


그림 2.6 드롭 이득에 따른 출력 임피던스 제한 예시

2.1.3 하이브리드 제어 방법에 따른 시스템 특징

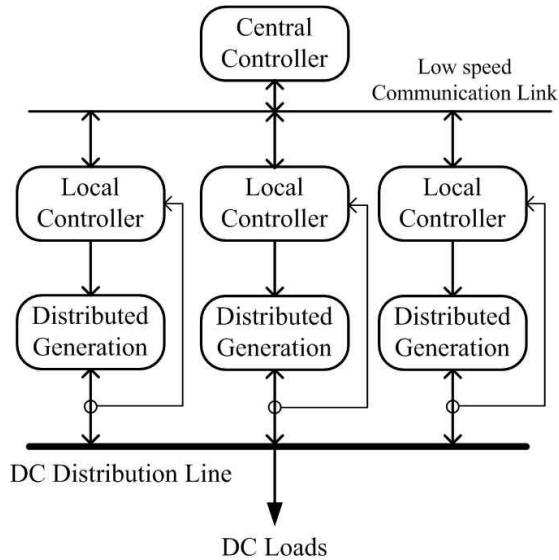


그림 2.7 계층 제어 방법의 블록도

중앙 제어 방법과 독립 제어 방법이 가지고 있는 장점과 단점이 명확하게 구분되어 있기 때문에 이를 서로 보완하기 위한 방안으로 하이브리드 제어 방법이 등장하였으며, 이는 구성에 따라 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 추가적인 통신 라인을 전혀 사용하지 않고, 배전 선로의 전압 레벨을 이용한 드롭 특성 곡선을 더 세분화하여 나눠 제어 전략을 미리 세분화 하여 동작시키는 방법으로 자율적 제어(Autonomous Control)[67-70]라고 통칭한다. 다른 한 가지는 개별 전력 변환 장치를 드롭 기반의 제어로 동작하면서 낮은 대역의 통신 라인을 이용해 추가로 장착된 상위 제어기의 명령을 수용하는 것으로 그림 2.7에서 나타낸 것과

같이 동작하는 계층 제어(Hierarchical Control)[29, 39, 71]방식이다. 두 방법 모두 드롭 기반의 제어를 통해 동작하며, 전자의 경우 통신이 필요 없다는 장점이 존재하지만 에너지 관리 방식이 고정되며 따라서 시스템의 에너지 사용 효율이 낮을 수 밖에 없다. 또한 시스템의 확장을 필요로 할 경우 효율적인 에너지 사용을 위해서는 미리 설정한 드롭 곡선을 모두 변경해야 할 수 있다는 단점이 존재한다. 후자의 경우 능동적인 에너지 관리와 용량 확장 시에도 에너지 관리의 유연성이 그대로 유지된다는 장점이 존재하지만 반대로 중앙 제어 방법과 마찬가지로 통신에 대한 의존성이 존재하며, 확장 시 중앙 제어기에 추가된 전력 변환 회로의 정보에 대한 변경이 필요하다는 단점이 존재한다.

더불어 배전 선로의 특성에서도 두 방식 모두 드롭 제어를 기반으로 하기 때문에 독립 제어 방법과 마찬가지로 드롭 이득에 의해 배전 선로의 임피던스가 크며, 이로 인한 동 특성 문제 및 설계 안정성의 문제는 동일하게 존재한다.

본 논문에서는 기존에 살펴본 하이브리드 제어와 다르게 마스터-슬레이브 제어를 기반으로 하는 계층 구조 방법을 제안한다. 제안한 시스템은 여러 분산 전원들 중 가장 제어 특성이 좋은 저장 장치를 마스터로 사용해 설계된 배전 선로 임피던스를 통하여, 통신 없이도 안정적으로 배전 선로 전압을 유지하는 직류 배전 시스템을 구성하는 것을 목표로 한다.

2.1.4 기존 제어 방법의 장 단점 비교

위에서 언급한 세 가지 제어 방법은 각자 장 단점이 다르며 이는 표 2.2에서 비교한 것과 같다. 중앙 집중형 제어는 여러 면에서 장점을 가지고 있지만 통신 의존성과 확장성에서 단점을 드러내 다양한 분산 전원들을 유연하게 사용하는 것을 중요시 하는 대용량 분산 전원 시스템에서는 사용이 활발하지 않으며, 계획된 용량 및 구획 내에서의 사용이 우선시되는 소규모 분산 전원 시스템에서 많이 사용된다.

표 2.2 제어 방법 별 특징 비교

	중앙 집중형 제어	독립 제어	하이브리드 제어
통신 의존성	높음	없음	낮음 (EMS, 전압 회복 등)
확장성	낮음	높음	높음
전류 분배 능력	높음	낮음	높음
배전 선로 전압 조절(regulation)	높음	낮음	낮음
배전 선로 동 특 성	빠름	느림	느림
시스템 운용 효 율성	높음	낮음	높음

시스템의 과도 상태 응답 특성 및 전압 리플에 대한 비교를 위해서는 하위시스템의 소신호 모델을 통한 출력 임피던스를 계산해야 하며 본 절에서 간략하게 드롭 기반 및 마스터-슬레이브 기반 시스템의 차이점을 정리한다.

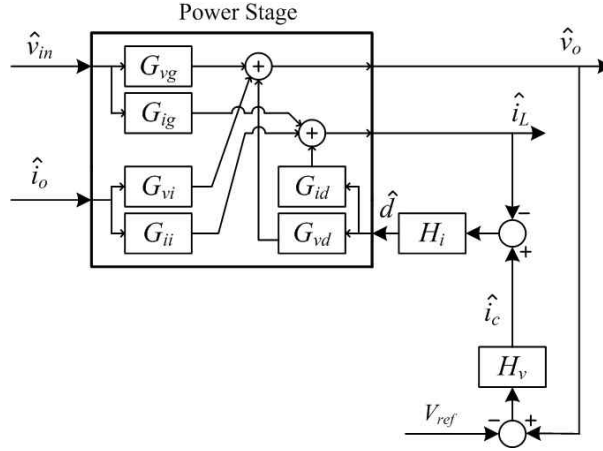


그림 2.8 일반적인 전력변환 회로의 이중 루프 제어 구조도

그림 2.8은 일반적인 전력변환 회로의 이중 루프 제어 소신호 블록 모델도를 나타낸다. 각 전달 함수의 의미는 표 2.1에 정의되어 있으며, 이를 참조한다. 자세한 수식 분석 및 유도 과정은 추후 각 하위 시스템의 설계 및 안정도 판별 부분에서 설명 하기로 하며, 본 절에서는 전류 제어기와 전압 제어기를 포함한 최종 출력 임피던스를 식 (2.1)처럼 확인하도록 한다.

$$G_{vi_cl} = \frac{1}{1+T_v} \left[G_{vi} - \frac{T_i}{1+T_i} \frac{G_{ii} G_{vd}}{G_{id}} \right] \quad (2.1)$$

해당 출력 임피던스는 그림 2.9처럼 나타낼 수 있는데 이는 전압 제어기

및 전압 루프가 추가되면서 오픈 루프 상태에서 G_v 의 저주파 대역 임피던스가 감소하는 것을 나타낸다. 여기에서 동일 소자를 이용해 구성된 시스템에서 전압 제어기의 대역폭이 출력 임피던스에 미치는 영향을 확인할 수 있는데, 제어기 대역폭의 주파수인 f_{BW} 가 높을수록 최대 출력 임피던스가 감소한다는 것을 알 수 있다.

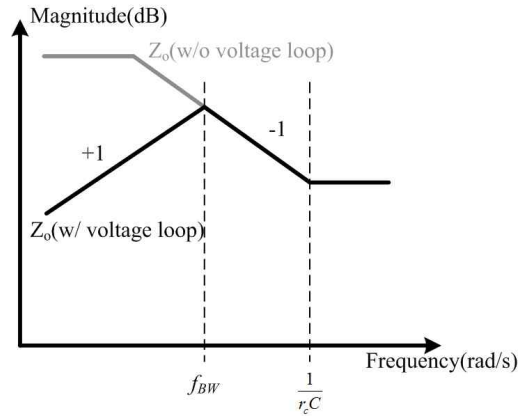


그림 2.9 일반적인 부스트 컨버터의 출력 임피던스 보드 선도

드롭 제어가 포함된 회로의 소신호 블록도는 그림 2.5에서 볼 수 있으며 여기서 드롭 이득 R_d 가 포함되어 출력 임피던스에 영향을 미치는데 이는 식(2.2)처럼 나타낼 수 있다.

$$Z_o = G_{v_{cl}} - R_d \frac{T_v}{1 + T_v}$$

$$T_i = G_{id} H_i$$

$$\text{Where, } T_v = \frac{T_i}{1 + T_i} \frac{G_{vd}}{G_{id}} H_v \quad (2.2)$$

$$G_{vi_cl} = \left[G_{vi} - \frac{T_i}{1 + T_i} \frac{G_{vd} G_{ii}}{G_{id}} \right] \frac{1}{1 + T_v}$$

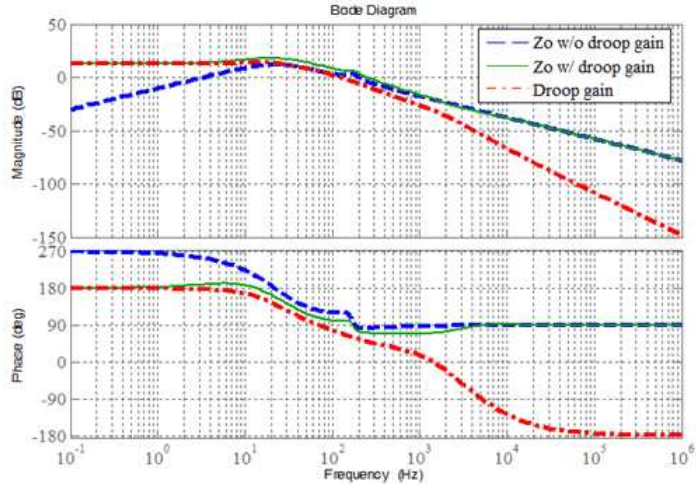
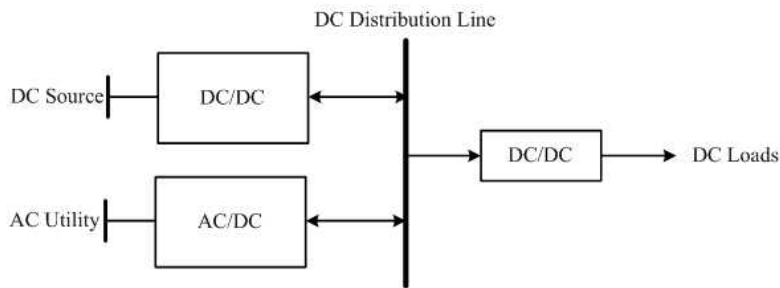


그림 2.10 드롭 제어 방식에서의 출력 임피던스 보드 선도

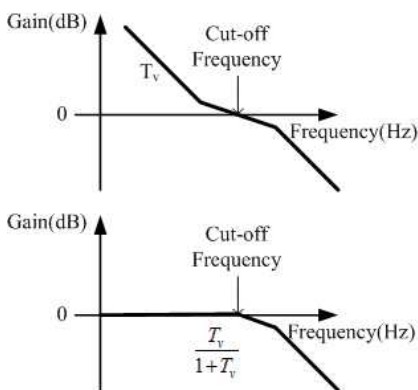
드롭 이득이 없을 때의 출력 임피던스인 G_{vi_cl} 와 다르게 드롭 이득인 R_d 에 의한 항이 추가되는데, 이 값이 전압 루프를 포함한 일종의 저주파 통과 필터인 $T_v/(1+T_v)$ 와 곱해져 출력 임피던스에 더해지면서 그림 2.10과 같은 보드 선도를 얻게 된다. 기존 출력 임피던스 곡선에 드롭 이득 항이 더해지면서 드롭 제어 방식을 사용한 시스템의 출력 임피던스는 저주파 대역에서 높은 값으로 고정되는데 이는 드롭 이득으로 인한 제어 전압 지령치의 변화를 의미하며 이로 인해 부하 변동에 따라 배전 선로 전압이

크게 변한다.

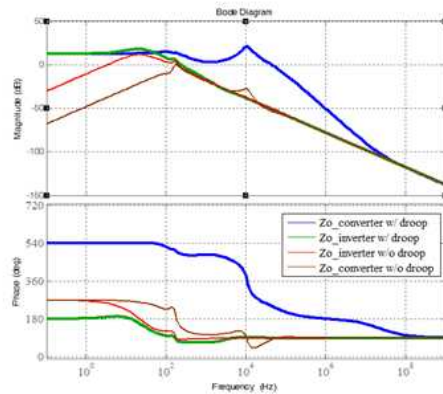
이러한 드롭 제어의 임피던스 제한 속성은 비슷한 성능의 여러 컨버터를 병렬 운행 할 때보다 서로 다른 특성의 분산 전원들을 모아서 컨트롤 하는 분산 전원 시스템에서 더 두드러진다. 분산 전원 시스템은 외부 계통과 같은 교류 전원이나 연료 전지, 에너지 저장 장치, 태양광 같은 직류 전원들을 모두 묶어 사용하는데 서로 다른 입력 전압 특성 및 용량 특성을 가지고 있기 때문에 회로의 동작 주파수 및 제어 대역폭의 설정이 각각 다를 수 밖에 없다.



(a) 병렬 연결된 직류 배전 시스템의 간단화한 블록도



(b) 드롭 이득 향의 특징



(c) 드롭 제어 시 출력 임피던스

그림 2.11 드롭 제어가 포함된 시스템의 출력 임피던스

일반적으로 교류 전원을 직류와 연결하는 정류기의 경우 직류와 직류를 연결하는 컨버터에 비해 전압 제어 대역폭이 더 좁으며, 따라서 전압 제어의 동 특성 및 임피던스 특성이 더 나쁘게 나타난다. 하지만 이러한 서로 다른 특성을 갖는 전력 변환 회로들을 드롭 제어를 이용하여 병렬 구성하였을 때에는 반대의 현상이 나타나며, 이는 그림 2.11으로 설명이 가능하다. 설명을 간략하게 하기 위해 그림 2.11의 (a)에서처럼 느린 전압 제어 대역폭을 갖는 정류기와 빠른 전압 제어 대역폭을 갖는 컨버터로 시스템을 가정하였으며, 이에 따른 정류기와 컨버터의 기본 출력 임피던스는 각각 그림 2.11의 (c)에 표시된 붉은색 그래프와 회색 그래프와 같다.

그림 2.11의 (b)는 드롭 제어가 포함되었을 시 드롭 이득 R_d 와 연계되는 값인 $T_v / (1+T_v)$ 의 특징을 나타낸 그래프로 이를 통해 전압 제어기의 대역폭이 넓을수록 드롭 제어의 경우 높은 주파수까지 드롭 이득에 의한 임피던스 제한 역시 넓게 나타나며, 이 결과는 그림 2.11의 (c)에 표시된 파란색과 초록색 그래프로 확인할 수 있다. 넓은 전압 제어 대역폭을 통해 낮은 출력 임피던스를 갖던 컨버터가 드롭 제어가 포함될 경우 오히려 더 나쁜 특성을 나타내며, 따라서 분산 제어 시스템의 전체 배전 선로 특성은 분산 제어 시스템을 구성하는 전력 변환 회로들 중 가장 느린 특성을 가진 회로를 따라가게 된다.

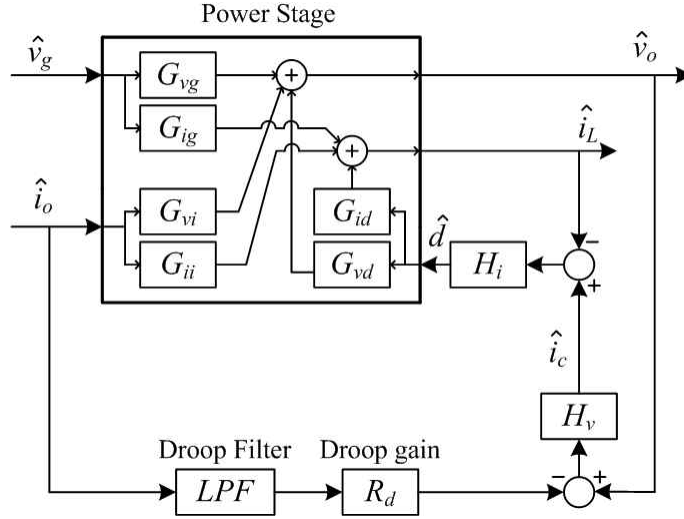


그림 2.12 필터가 포함된 드롭 제어 시스템의 소신호 블록도

이러한 드롭 이득으로 인한 임피던스 제한 특성을 줄이기 위해 드롭 이득인 R_d 에 필터를 추가하는 방식 역시 논의되었으며[46, 72], 그림 2.12의 소신호 블록도와 같은 시스템의 출력 임피던스 역시 함께 확인해 보도록 한다.

그림 2.13은 드롭 이득에 필터가 없는 경우와, 2차 저주파 통과 필터 (Low Pass Filter : LPF), 그리고 특정 주파수 대역 저지 필터 (Band-Stop Filter)가 포함된 1차 LPF의 예시를 각각 나타낸다. 각 필터의 차단 주파수는 예시용으로 사용된 전력 변환 회로의 전압 제어 대역폭보다 낮게 설정하여, 출력 전류의 변동에 대한 과도 응답을 감소시키고, 부하의 특정 주파수 외란에 대한 영향을 감소시키는 것을 목표로 한다.

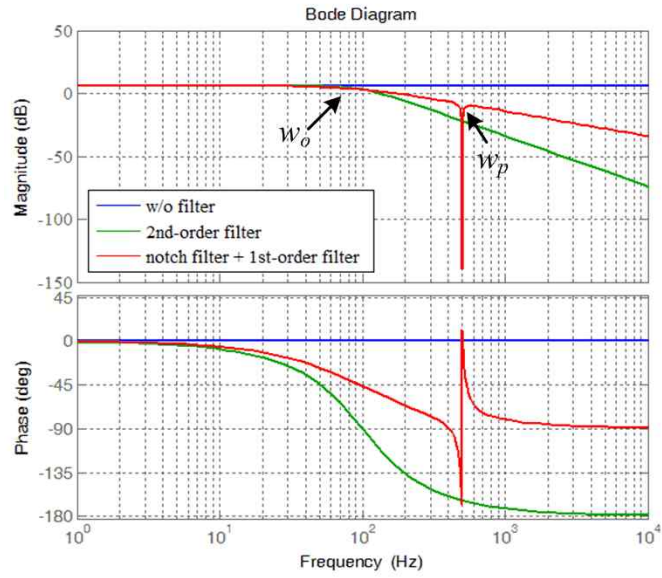


그림 2.13 사용된 필터 예시

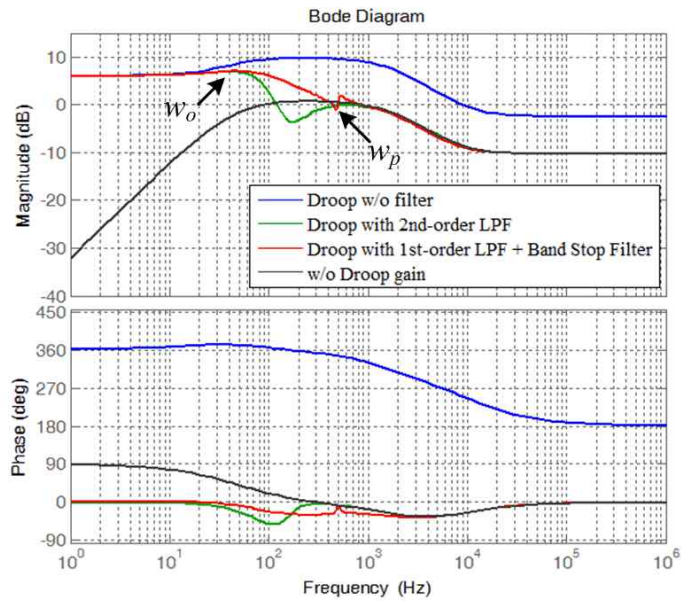


그림 2.14 필터가 포함된 드롭 제어 시스템의 출력 임피던스 예시

그림 2.14는 예시에서 나타난 각 필터가 사용된 드롭 제어 시스템과 드롭 제어를 사용하지 않는 경우의 출력 임피던스를 도시한 보드 선도를 나타낸다. 이를 통해 저주파 통과 필터가 포함된 드롭 제어 시스템의 경우에는 필터가 없이 저항 성분만을 이용한 경우에 비해 고주파 영역에서 드롭 제어가 사용되지 않은 시스템과 동일한 출력 임피던스를 얻을 수 있지만 저주파 영역에서는 필터가 없는 드롭 제어와 마찬가지로 높은 출력 임피던스를 나타내는 것을 확인 할 수 있으며, 따라서 필터를 설계하여 추가하는 경우에도 드롭 제어가 마스터-슬레이브 제어에 비해 여전히 큰 출력 임피던스를 얻는다는 결과를 확인 할 수 있다. 또한 필터가 포함된 드롭 제어 시스템의 경우, 출력 임피던스의 위상(Phase)에서 최대 90° 의 손해를 보게 되는데 이 역시 시스템 전체의 안정적인 설계를 하는데 있어 영향을 미친다.

더불어 필터를 사용하여 출력 임피던스를 안정화 시키는 형태는 결국 고주파 외란 또는 부하 변동이 발생 했을 경우 해당 주파수 성분에 대한 회로들의 전류 분배를 포기하는 방식으로, 출력 임피던스 감소를 위해 극단적으로 낮은 차단 주파수를 갖는 필터를 사용하는 경우 드롭 본연의 목적중에 하나인 통신 없이 각 회로간의 생산 전력 및 스트레스를 분산시키는 능력을 포기하게 된다. 따라서 드롭에 필터를 사용하는 것은 필요에 따라 안정성과 전류 분배간에 트레이드-오프(trade-off)로서 시스템 설계의 기준점이라 할 수 있다.

2.2 제안하는 제어 방식의 동작 개요

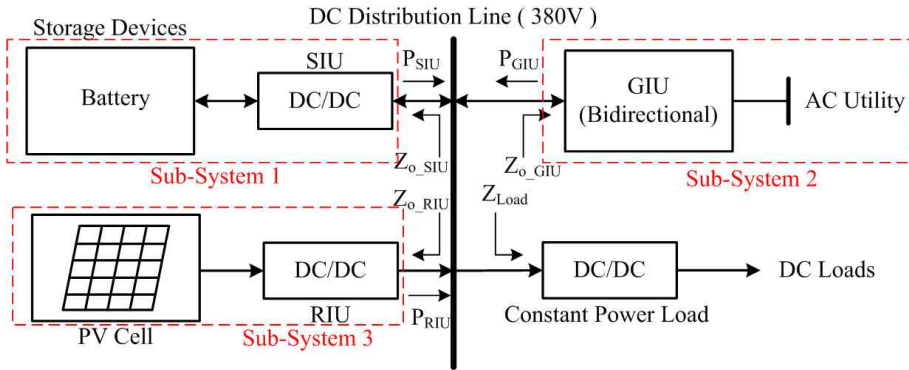


그림 2.15 직류 배전 시스템의 간략화한 (a) 구조도와 (b) 마스터-슬레이브 형태로 변환한 개략도

그림 2.15는 그림 2.1의 직류 배전 시스템을 더 간략화하여 나타낸 구조도이다. 일반적인 분산 전원들을 3가지로 나눠 각각 외부 교류 계통, 저장 장치, 그리고 신 재생 에너지로 대표하고, 이들을 전력 변환 회로에 연결 시켜 직류 배전 선로를 구성한다.

소규모 분산 전원 시스템의 주 목적은 각각의 분산 전원들을 더 효율적으로 사용하고, 또한 부하를 위해 배전 선로의 전압을 더 안정적으로 유지하는 것으로 마스터-슬레이브 제어가 적용된 시스템의 경우 마스터의 역할을 맡은 하위 시스템(Sub-System)이 배전 선로의 품질과 안정성을 유지하고, 슬레이브의 역할을 맡은 하위 시스템은 배전 선로에 에너지를 공급하는 역할만을 맡게 된다. 기존의 마스터-슬레이브 제어에서는 슬레이브의 공급 에너지 양을 통신에 의존하여 제어하였기

때문에 하위 제어의 안정성과 독립성을 추구하는 계층 구조에 부적합하였지만 본 논문에서는 DC Bus Signaling (DBS) 방식을 적용하여 추가 통신 없이 마스터-슬레이브 제어를 유지시키는 방법에 대해 제안하고 이 방식의 설계 및 구성에 대해 논의한다.

분산 전원 시스템에서 일반적으로 적용되고 있는 DBS 방식[73, 74]은 드롭 제어의 일종으로, 그림 2.16에서처럼 드롭 곡선을 비선형적으로 혹은 단계를 나눠 구성함으로써 2장에서 언급한 자율 제어의 성격을 띠도록 구성한 것을 뜻한다. 해당 방식은 배전 선로 전압의 왜곡에 대한 강인함과 전류 분배의 능동성을 위해 제안된 방식이다.

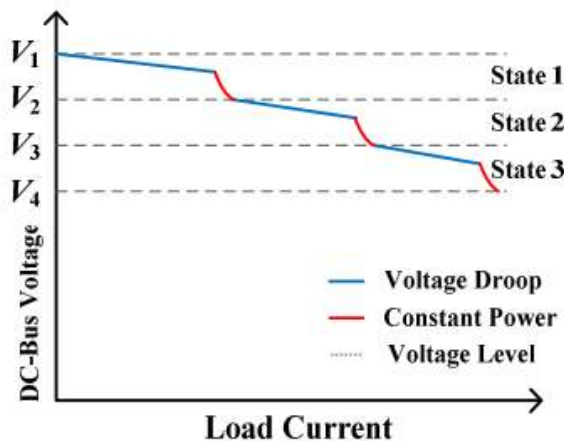


그림 2.16 DC Bus Signaling방식의 의 개념도[73]

하지만 본 논문에서 언급한 DBS방식은 좀더 포괄적인 의미로 배전 선로 전압에 변동을 주어 추가 통신선 없이 정보를 전달 할 수 있는 방식을 의미한다. 이제 상위 그리고 하위 각 제어기의 구성을 설명하면서 DBS를 적용한 마스터-슬레이브 제어 방식의 개념을 논하도록 한다.

2.2.1 제어 방식 개요

전력전자 시스템에서의 마스터-슬레이브 제어는 본래 슬레이브의 전류 루프를 마스터에 포함 시켜 마스터의 전체 전압 및 전류 루프가 동작함에 따라 슬레이브의 전류가 자동으로 마스터에 맞춰 제어되는 방식이다. 다만 이는 멀티 모듈 전력변환 회로에 해당하는 내용으로 다양한 특성을 지닌 여러 분산 전원들이 거리를 두고 설치되어 있는 분산 제어 시스템에서는 적합하지 않았고, 따라서 통신을 이용한 중앙 제어기의 사용이 이루어졌다. 이러한 제어의 바탕에는 마스터 또는 중앙 제어기에서 각 슬레이브들의 정보를 받고, 지령을 줄 수 있는 양방향 통신선의 존재가 필수적인데, 제안하는 추가 통신선 없는 DBS 마스터-슬레이브의 경우 이러한 기존 마스터-슬레이브 제어와 전제 조건이 달라질 수 밖에 없다. 배전 선로 전압을 하위 시스템간의 유일한 통신 수단으로 사용할 경우, 배전 선로 전압을 제어하는 마스터만이 유일한 정보 전달자가 되며, 슬레이브들의 경우 전부 정보 수용자의 역할만을 할 수 있으므로 제어의 목표 및 방식이 달라져야 한다. 만일 배전 선로 전압에 부하 정보를 반영할 경우를 생각해 보면, 이는 기존 드롭 시스템과 동일하게 부하에 따른 전류 분배라는 목표를 달성 할 수 있지만, 역시 동일한 임피던스 제한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 부하 정보가 아니면서, 시스템의 유지 및 부하 분배의 목적을 달성 할 수 있는 새로운 정보를 사용할 필요성이 발생한다.

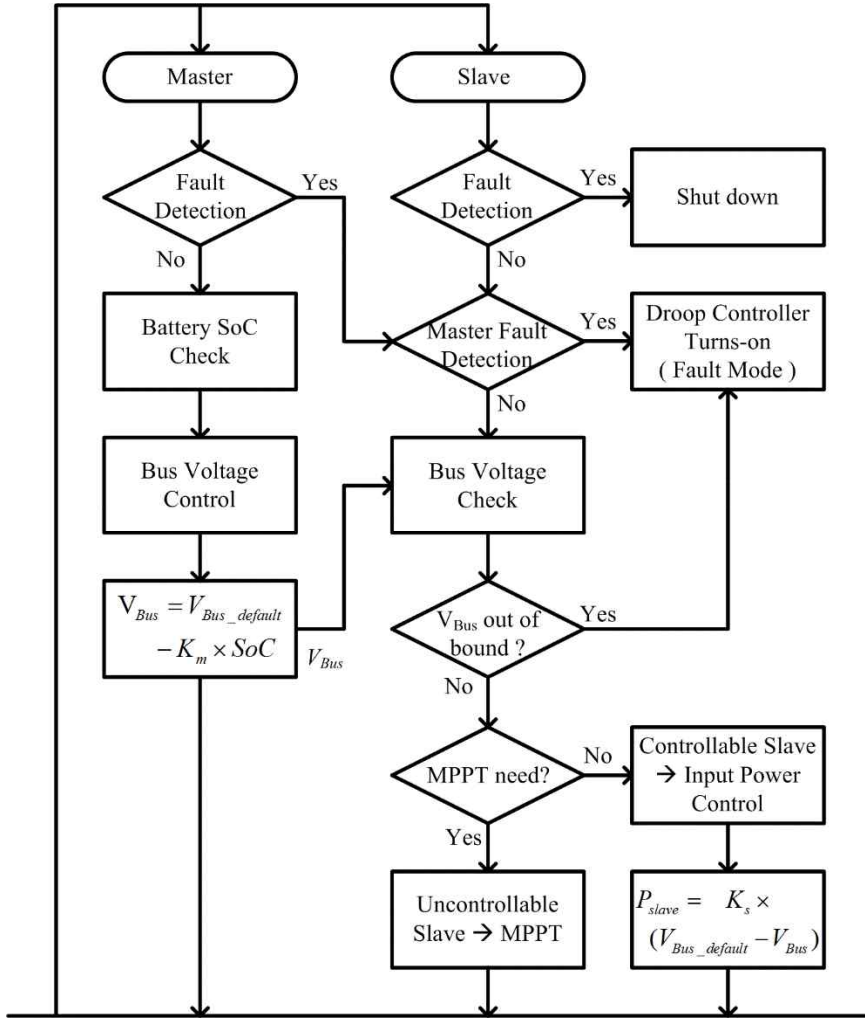


그림 2.17 제안한 제어 방식의 운영 전략 플로우-차트

그림 2.17은 제안하는 DBS 마스터-슬레이브 제어의 운영 전략에 대한 플로우-차트로, 해당 운영의 기본 골자를 표현한다. 제안한 시스템은 전력 분배 기준으로 저장장치인 배터리의 에너지 저장 상태를 나타내는 지표인 State-of-Charge (SoC) 를 채택하여, 각 분산 전원의 에너지 발전량을

조절한다. 즉, 부하가 커져 저장 장치에서 에너지를 지속적으로 사용 할 경우 SoC가 감소하고 이를 통해 다른 분산 전원의 발전량을 버스 전압을 통해 지시하는 것을 목표로 한다[75].

그림 2.18은 제안한 제어 방식을 사용한 분산 전원 시스템의 동작 개략도를 나타낸다. 마스터는 SoC 값의 변동에 따라 배전 선로 전압을 제어하는 전압원이 되며, 슬레이브는 두 가지로 나뉘어 그림 2.17의 운영 전략 플로우 차트에서 제어형(Controllable)과 비제어형(Uncontrollable)으로 나누어 나타낸 것처럼 배전 선로에 정해진 전력을 전달해주는 전류원과 신 재생 에너지의 발전량을 최대로 유지시켜주는 전류원의 형태로 치환 가능하다. 각 마스터와 슬레이브에 직렬 또는 병렬로 연결되어 있는 가변 저항은 제어기의 동작 및 이로 인한 배전 선로단에서 하위 시스템으로 보이는 출력 임피던스를 나타낸다.

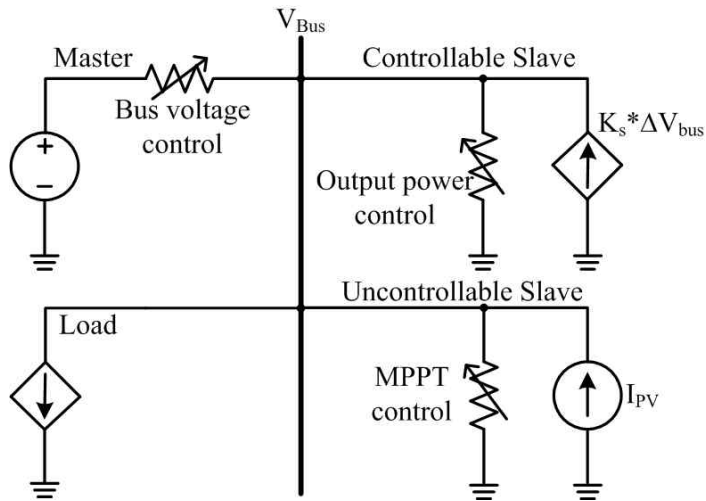


그림 2.18 제안한 제어 방식의 구조 개략도

기존의 계층 구조에서 각 분산 전원의 에너지 발전량을 정하는 것은 총 부하량 및 각 분산 전원의 에너지 분담 비율이었다. 이 때문에 독립 제어 상황에서 분산 제어 시스템은 저장 장치의 과 충전, 또는 과 방전과 같은 상황이 발생하고 이에 따른 상황에 대한 인식 및 그에 따른 동작 모드를 상황에 따라 세세히 설계해야 하는 단점이 있었다. 그림 2.19는 기존 자율 제어 시스템의 모드 및 동작 설명으로 저장 장치, 부하, 신 재생 에너지 발전량에 따라 여러 동작 모드가 복잡하게 구성되어 있음을 나타낸다. 해당 동작 모드 구분은 에너지 매니지먼트(Energy Management Strategy: EMS) 알고리즘이 복잡해 질수록, 그리고 분산 전원의 개수가 늘어날수록 더욱 다양하게 늘어나며, 이는 시스템의 안정적이면서 효율적 동작을 위해서는 각 하위 시스템의 설계가 복잡해짐을 의미한다.

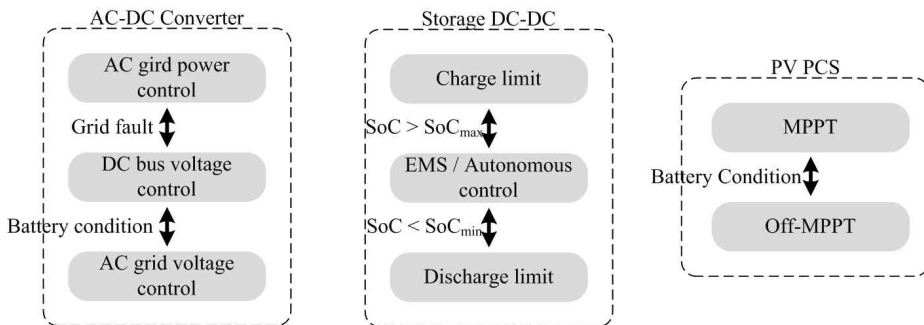


그림 2.19 기존 자율 제어 방식에서 각 하위 시스템의 동작 구분

반면에 제안한 제어 알고리즘은 SoC를 지표로 분산 전원들의 발전 에너지를 지령하기 때문에 사실상 저장 장치가 과 충전 또는 과 방전될 경우가 발생하지 않는다. 따라서 해당 제어 방식은 추가적인 동작 설계가 필요하지 않다는 장점이 있다.

2.2.2 하위 제어기

앞서 언급했듯이 제안한 제어 알고리즘은 저장 장치의 에너지 저장 상태를 지표로 전력 분배를 수행하도록 계획되었는데, 마스터 역할을 맡은 하위 시스템이 이 정보를 받아들이는 데는 두 가지 방법이 존재한다. 첫 번째는 저장 장치의 상태를 상위 제어기에서 확인하고 통신을 통해 마스터에 보내는 것으로, 저장 장치의 에너지 상태 변화 속도가 상대적으로 매우 느리기 때문에 낮은 대역폭의 통신으로도 충분하며 충분한 신뢰성을 확보 할 수 있어 시스템 유지에는 문제가 없다. 하지만 해당 방법의 경우 결국 통신 문제가 발생하거나 중앙 제어기에 문제가 발생 할 경우 시스템의 유지에 문제가 생길 수 있기 때문에 보조의 역할로 한정한다.

두 번째 방법은 마스터를 저장 장치가 직접적으로 연결되어 있는 하위 시스템으로 선정하는 방법이다. 이 경우 마스터가 직접적으로 저장 장치의 출력 전압 및 전류를 센싱 가능하며, 이를 통해 저장 에너지 정보를 스스로 계산 할 수 있기 때문에 사용이 용이하다는 장점이 있다. 다만 해당 방식의 경우 마스터에서 배전 선로 전압 제어 뿐만 아니라 저장 장치의 상태까지 관리해야 하기 때문에 처리해야 하는 데이터 양이 크게 늘어나는 단점이 있는데, 이를 해결하기 위해 전압 센싱만으로 저장 장치의 에너지 상태를 추정하는 간략화한 알고리즘을 사용하고[76, 77], 상세한 데이터는 상위 제어기에서 처리하여 보정하는 방식을 사용하는 것 역시 가능하다.

그림 2.20은 DBS를 적용한 마스터-슬레이브 제어 시스템의 간략화한 개념도를 나타낸다. 우선 마스터 곡선을 보면, 저장 장치의 SoC 상태에 따라 선형적으로 배전 선로 전압을 변동시키도록 되어 있다. 슬레이브 곡선은 이렇게 변동된 배전 선로 전압에 따라 각 회로의 인덕터 전류 또는 입력 전력량을 조절하도록 되어 있는데, 이를 통해 부하가 어떤 방식으로 변해도 저장 장치의 에너지 저장량이 슬레이브 커브에 의해 정해진 SoC의 최소 및 최대 값 사이로 유지한다.

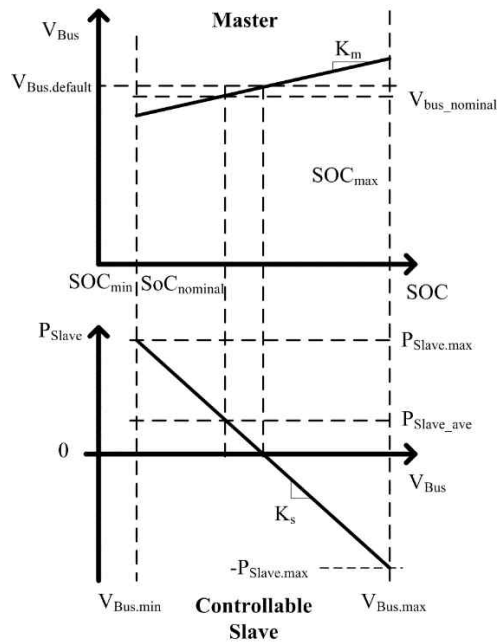


그림 2.20 간략화한 DBS 마스터-슬레이브 곡선

마스터와 슬레이브의 DBS 이득인 K_m 과 K_s 는 각각 SoC 변동에 따른 배전 선로 전압의 변화폭과 이에 따른 발전 에너지량을 표시하는 상수로 각각 식 (2.3)과 식 (2.4)처럼 나타낼 수 있으며, 이때 해당 분산 전원이

양방향 동작이 가능한 경우 (예: 계통, 저장 장치) K_s 에 2를 곱한다.

$$K_m = \frac{\text{배전 선로 전압 변동 범위}}{\text{SoC 변동 범위}} \quad (2.3)$$

$$K_s = - \frac{\text{분산 전원 최대 발전량}}{\text{배전 선로 전압 변동 범위}} \quad (2.4)$$

해당 곡선은 가장 기본적인 형태로 저장 장치의 에너지를 이론상 가장 넓은 범위에서 사용 가능하지만, 실제 부하의 프로파일의 반영이 어려우며, 각 하위 시스템의 센싱 오차 또는 각 소자 값의 오차, 그리고 배전 선로 임피던스로 인한 값의 왜곡 등의 문제에 대해 취약하기 때문에 해당 곡선에 대해 몇 가지 변형이 추가 될 수 있다.

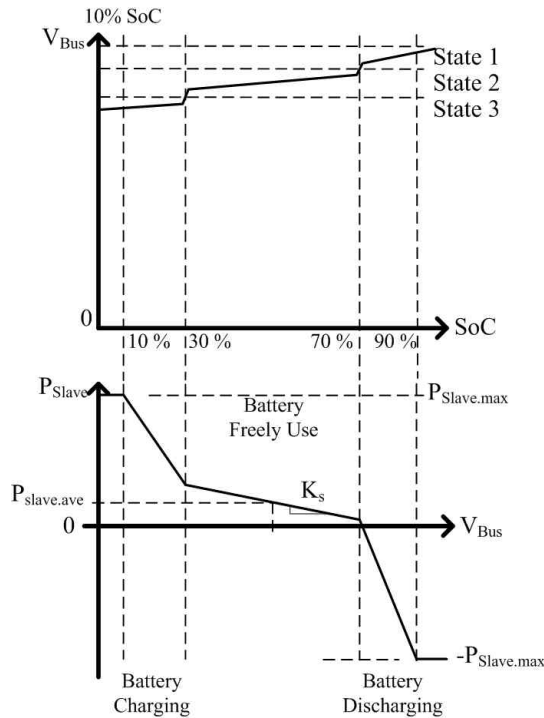


그림 2.21 DBS 마스터-슬레이브 곡선 변형

그림 2.21은 이러한 DBS 마스터-슬레이브 곡선을 변형시키는 방법에 대해 나타낸 것이다. 변형 방식은 간략하게 3가지 정도로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 배전 선로 전압을 비선형적으로 단계를 나눠 형성하는 것으로, 이를 통해 저장 장치의 에너지 저장량에 따라 동작 모드를 나누고 센싱 오차나 전압 왜곡으로 인한 마스터와 슬레이브 사이의 오차를 줄일 수 있다. 해당 방식은 그림 2.16의 기존 DBS 동작 방식과 동일하며, 얻을 수 있는 장점 역시 거의 동일하다고 볼 수 있다.

두 번째 방식은 이러한 모드 변동에 따라 슬레이브의 기울기 역시 비선형적으로 변형시켜 주는 방식이다. 저장 장치가 더 넓은 범위에서 충방전을 자유롭게 할 수 있는 구간에서는 작은 K_s 값을 사용하고 저장 장치의 에너지 상태가 양쪽 한계 상황에 가까워 질수록 K_s 의 기울기 값을 키우는 등의 간단한 방식의 에너지 스케줄링이 가능하다. 세 번째는 슬레이브 발전량의 오프셋을 변화시키는 방법으로 평균 부하량과 신 재생 에너지 등의 평균 생산량을 이용해 저장 장치 SoC값의 기준 위치나 기준 발전량 등을 변동시킬 수 있다.

이에 대한 각 값의 선정 및 이에 따른 상세한 분석은 전체 시스템 설계와 함께 다음 장에서 제시한다.

2.2.2.1 다중 모듈에 대한 하위 제어기 구성

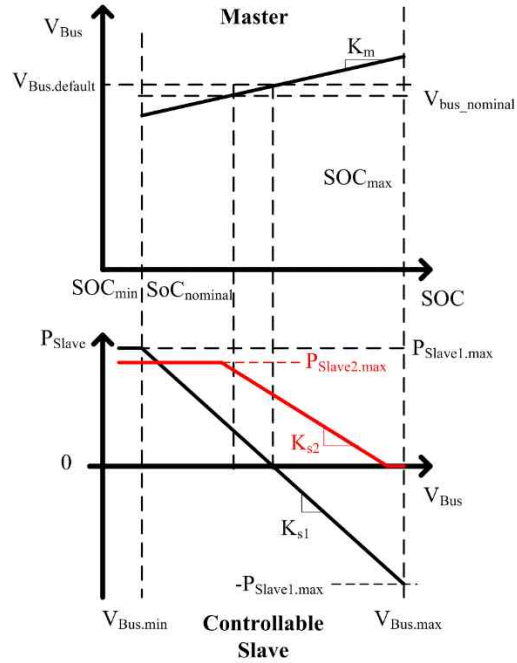


그림 2.22 두 개의 다른 특성을 가진 제어형 슬레이브를 포함한 시스템의 DBS 커브 예시

본 논문에서는 RIU, GIU, SIU가 각각 하나씩 존재하는 시스템에 대하여 DBS 마스터-슬레이브 제어 방식을 고려했지만, 실제 분산 전원 시스템은 여러 개의 전원을 포함할 수 있으며, 이에 따른 DBS 마스터-슬레이브 구성의 확장안에 대한 언급이 필요하다.

그림 2.22는 두 개의 서로 다른 특성을 가진 제어형 슬레이브가 포함된 시스템에서의 DBS 마스터-슬레이브 커브를 표현한 것이다. 보조용으로

디젤 발전기 등이 포함된 시스템 등에서 나타날 수 있는 형태이며, 각 슬레이브의 특성 및 SoC에 따른 사용 시점 등을 고려하여 구성 할 수 있다. 즉, 제어형 슬레이브는 마스터가 슬레이브들이 발전하는 총 에너지를 제어 할 수 있는 범위 내에서 자유롭게 확장 및 운용에 대한 설계가 가능하며, 이 때 슬레이브 커브의 디자인은 기존 드롭 제어 커브의 DBS 설계와 다르지 않다.

다음은 비 제어형 슬레이브가 증가하는 경우이다. 기본적으로 비 제어형 슬레이브가 여러 개 달릴 경우에는 단순히 여러 개의 정 전력 발전기가 추가된 형태로 고려하여 추가 DBS 커브 또는 운용에 대한 고려를 할 필요가 없지만, 비 제어형 슬레이브의 최대 발전량이 제어형 슬레이브의 최대 발전량보다 크게 설계된 경우에는 DBS 커브 동작만으로는 SoC를 일정 범위 내에서 유지하기가 불가능하기 때문에 제어 동작을 다르게 설정하는 것이 필요하다. 해당 상황은 다시 말하면 비 제어형 슬레이브에서 발전되는 에너지를 제어형 슬레이브의 발전/소비 제어를 통해 전부 해소하는 것이 불가능하기 때문에 SoC가 최저 또는 최대점 밖으로 넘어가게 되는 과 충전/과 방전의 상태가 발생하게 되고, 이에 따라 비 제어형 슬레이브 역시 해당 상황에서는 배전 선로 전압 제어를 위해 기존의 MPPT 제어를 포기해야 함을 의미한다. 이에 따른 시스템의 동작은 off-MPPT 제어의 형태로서, 기존 직류 배전 시스템의 운용과 관련된 여러 논문들에서 이미 언급 및 정리되어 있으며[71, 78, 79], DBS 마스터-슬레이브 제어 방식의 경우 SoC의 상태가 배전 선로 전압에 이미 반영되어 있기 때문에 추가 통신 없이 해당 동작으로의 전환에 유리하다.

2.2.3 상위 제어기

제안한 시스템에서 상위 제어기의 기본 개요는 기존 계층 구조 시스템의 Level 2, Level 3과 거의 동일하다. 각 하위 시스템들의 에너지 발전량 확인 및 신 재생 에너지원의 발전량 예측, 그리고 부하량 예측 등이 필요하며, 이를 토대로 효율, 경제성 등의 여러 가지 측면에서의 에너지 운용 방안 등을 처리해야 한다[80,81].

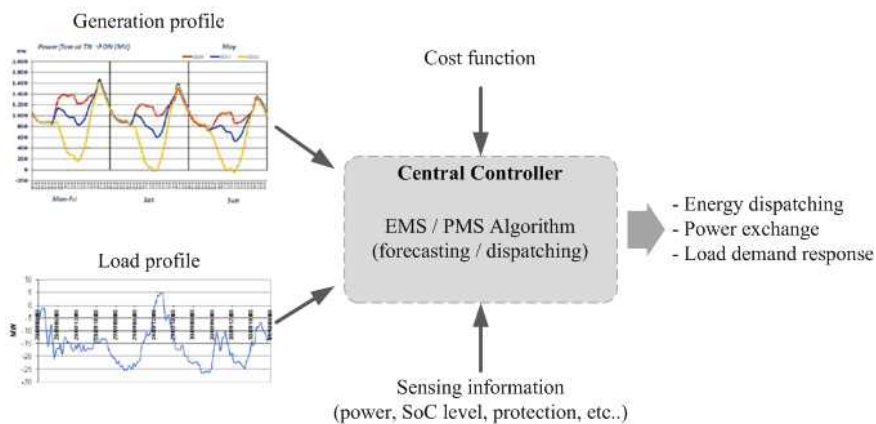


그림 2.23 중앙 제어기의 개념 및 동작

그림 2.23는 해당 중앙 제어기의 EMS 알고리즘을 표현한 것으로, 이러한 역할 수행은 그 특성에 따라 다양한 연구들에서 진행되었으며[4,23, 80-82], 본 논문에서는 하위 제어 방식을 DBS 마스터-슬레이브 제어 형태로 바꿈에 따라 어떠한 변경점이 발생하는지에 대해 추후 모의 실험 결과와 함께 논의한다.

제 3 장 하위 시스템 설계 및 분석

3.1 개별 제어기의 동작 원리

앞 장에서 설명한 DBS 마스터-슬레이브 제어 방식을 이용하여 시스템을 구성하기 위해서는 각 하위 시스템의 역할을 선정 및 목적에 맞춰 설계해야 한다. 해당 마스터-슬레이브 제어의 하위 시스템은 세 가지로 나눌 수 있으며, 이는 각각 시스템을 구성하고 있는 RIU, SIU와 GIU에 대응 될 수 있다. 마스터는 배전 선로 전압을 제어하며, 이때 저장 장치의 SoC를 이용하여 에너지 분배 정보를 배전 선로에 반영하기 위해 SIU를 마스터로 삼는다. SIU는 교류 입력 전압을 갖는 GIU에 비해 전압 제어기의 대역폭을 더 높게 가져갈 수 있기 때문에 동일 소자 값을 사용할 경우 전체 시스템의 배전 선로 임피던스를 더 작게 만들 수 있으며, 추가 통신 없이도 입력 전압 센싱만을 통해 SoC를 추정할 수 있다는 장점이 있어 마스터에 적합하다.

두 번째는 제어형 슬레이브이다. 제어형 슬레이브는 배전 선로 전압을 통해 저장 장치의 상태를 전달 받아서, 배전 선로에 전달되는 에너지 양을 미리 설정된 DBS 커브에 따라 전달 가능한 회로이다. 이를 위해서는 연결된 분산 전원의 에너지 생산이 조절 가능해야 한다는 특징이 있으며 이를 만족하는 것은 GIU이다. 이러한 제어형 슬레이브는 사실상 마스터로서의 기능을 해도 문제가 없는 에너지 원으로 구성되어 있으며, 따라서 실질적으로 분산 전원 시스템의 에너지 분배를 맡고 있다고 볼 수

있다.

마지막은 비 제어형 슬레이브로서 RIU와 같은 신 재생 에너지와 연결된 하위 시스템을 의미한다. 태양광과 같은 신 재생 에너지원들은 주변 환경이나 기상 상태에 따라 발전량이 변동되며, 이 발전량을 최대한 유지하기 위해서는 최대 전력 추종 제어 (Maximum Power Point Tracking : MPPT) 제어가 필요한데, 해당 제어 방식은 배전 선로 전압을 제어하는 것이 아니라, 고정된 배전 선로 전압을 기준으로 태양광 패널의 전압을 제어하는 형태로 이루어진다. 즉, 신 재생 에너지원과 연결된 회로들은 해당 에너지원을 효율적으로 사용하기 위해 분산 제어 시스템에서의 에너지 분배와는 다른 형태로 동작하게 되며, 따라서 정 전력원 혹은 제어의 형태에 따라 부하와 같은 형태를 취한다.

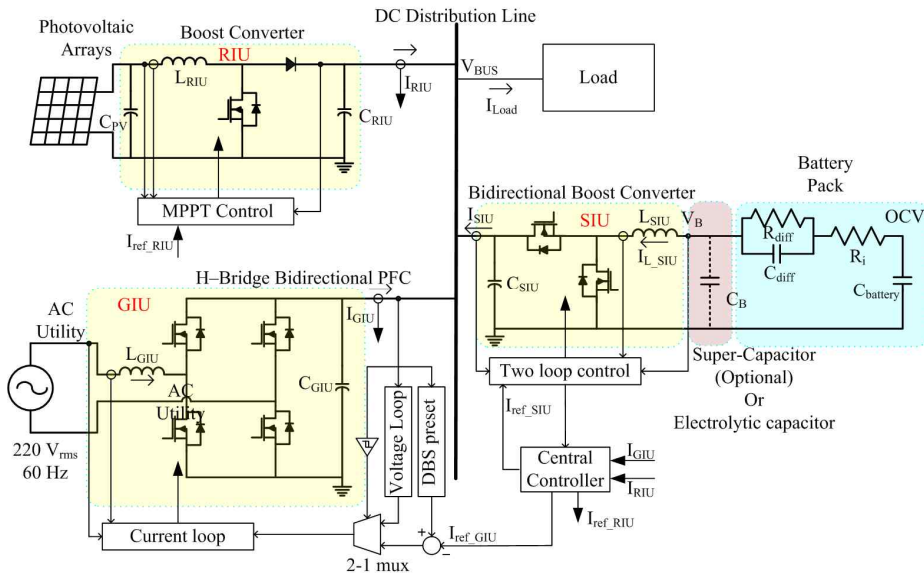


그림 3.1 제안한 시스템 상세 구성도

그림 3.1은 제안한 시스템의 상세 구성도를 나타낸다. GIU는 Bridge-less 양방향 PFC 회로로 구성되어 외부 계통과 전력을 주고 받을 수 있도록 구성되어 있으며, RIU는 단 방향 Boost 회로, 그리고 SIU는 양방향 Boost 회로로 구성한다. 이에 따른 각각의 회로 동작, 특징을 확인하고 개별 하위 시스템들의 설계를 진행한다.

3.1.1 RIU의 특징

태양광 발전 시스템과 연결된 전력 변환 회로는 앞서 말했듯이 MPPT 제어를 기본으로 하며[83] 따라서 태양광 발전 장치의 최대 발전 용량을 생산하는 것을 목표로 한다. 부하가 발전량보다 작아 생산 에너지에 여분이 남을 경우에도 저장 장치를 통해 남는 잉여 에너지를 저장하거나 양방향 외부 교류 계통 연계 컨버터를 이용해 잉여 에너지를 판매하는 것을 목표로 하며 따라서 본 논문에서는 RIU를 정 전력원으로 고려하여 분석 및 시뮬레이션을 진행한다.

3.1.2 GIU의 특징

계통과 연계된 양방향 직류-교류 정류기는 평상시 상위 제어기의 전류 지령치에 맞춰 전류 제어만을 하는 PFC의 동작 목표만을 맡는다. 전압 제어는 마스터인 SIU에 일임하며 따라서 그림 3.2에서처럼 교류 전류원으로 생각 할 수 있다.

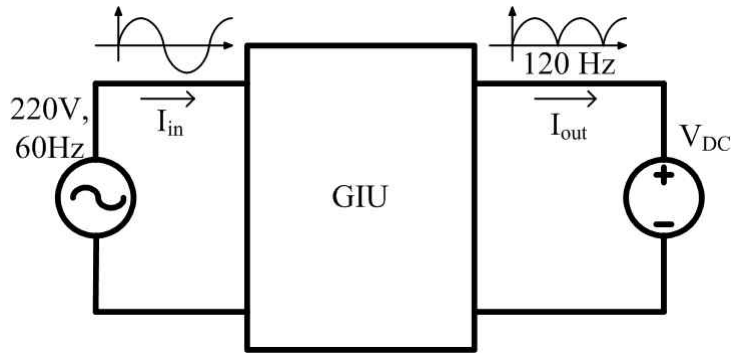


그림 3.2 GIU의 기본 동작 개념

하지만 통신 및 마스터 사고 상황에서는 드롭 제어를 통해 배전 선로의 전압 제어를 맡아야 하기 때문에 앞서 말했던 DBS 방식에 따라 RIU, SIU와의 전력 분배를 고려한 드롭 곡선을 설계해야 하며 이 드롭 제어기가 동작하기 위한 사고 판별 방법 및 그에 따른 제어기 동작 변화 방법을 적용해야 한다.

3.1.3 SIU의 특징

저장 장치와 연결된 양방향 전력 변환 장치는 직류 배전 선로의 전압을 안정적으로 유지하는 것이 첫 번째 목표이며 GIU와 마찬가지로 통신 사고 상황이 발생할 경우 드롭 곡선을 적용하기 위한 알고리즘과 사고 판별 기능을 포함한다. 배전 선로의 임피던스를 감소시켜, 빠른 동 특성을 얻고, 안정적인 설계를 용이하게 하기 위해 마스터-슬레이브 제어를 적용함에 있어 높은 전압 제어 대역폭을 갖도록 설계하는 것이 필요하다.

제안한 제어 방식은 GIU에서 생기는 전류 리플 및 부하 변동 시 생기는 과도 상태 전류를 SIU가 제어하기 때문에 저장 장치의 입 출력 전류가 직류 형태를 띌 수 없으며 이에 따른 저장 장치 사용 및 수명에 관련된 논란이 발생한다[84].

분산 전원 시스템에서 저장 장치는 주로 배터리가 사용되고 있으며 이 배터리의 경우 수명 및 내부 저항으로 인한 손실 문제로 인해 직류 전류를 이용해 충전 및 방전하는 것을 권하고 있다. 이러한 이유로 인해 저장 장치와 연계된 전력 변환 회로는 그 사용에 제약이 많으며 넓은 전압 제어 대역폭을 가질 수 있는 특성을 가지고 있음에도 그 장점을 살릴 수 없었다.

이러한 아쉬움을 해결하고 또한 배터리의 사용 방식을 늘리기 위해 여러 연구들이 진행되었는데 이러한 연구는 크게 두 가지 분류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 배터리 자체의 특성에 대한 연구로 배터리 충전 및 방전 전류를 교류나 펄스 형태로 변경하는 등 배터리의 전기적 특성을 확인하는 연구이다[85, 86]. 이 연구들을 통해 배터리의 충 방전 전류 주파수에 따라 배터리의 내부 저항 및 그 특성이 달라짐이 확인되었으며 이는 특성은 그림 3.3과 같이 전기적 등가 모델로 나타낼 수 있다.

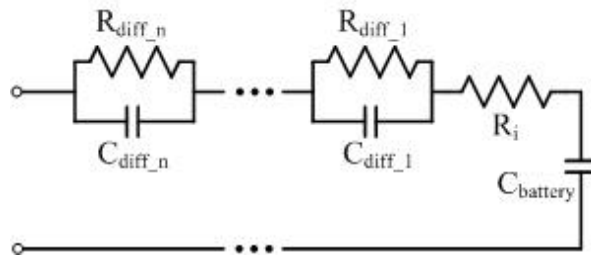


그림 3.3 배터리의 전기적 등가 모델

여러 연구들이 교류 형태를 이용한 배터리의 충 방전이 배터리 물성에 영향을 주지 않음을 밝히기 위해 진행되었으나[87-89], 반대로 직류를 이용한 충전 및 방전이 내부 저항으로 인한 손실을 감소시켜 배터리 노화의 주 원인인 손실열을 줄여 수명 연장에 도움이 된다는 주장[51, 90] 역시 존재하며 이 부분에 대한 연구는 확실한 결론이 나지 않은 상태이다.

두 번째 연구 방향은 배터리와 다른 특성을 지닌 저장 장치들을 혼용하여 사용하는 방안인데 이 부분은 저장 장치의 에너지 밀도 및 전력 밀도 설계 그리고 부피 및 가격에 대한 문제로 인해 여러 분야에서 이미 연구가 되고 있다. 본 논문에서는 배터리 외에 슈퍼-커패시터를 혼용하여 사용하여 배터리 입력 전류를 평활화 시키기 위한 기본 설계 및 배터리와 슈퍼-커패시터의 용량 선정 방안에 대해 논의한다.

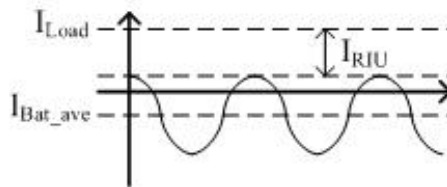


그림 3.4 저장 장치 입 출력 전류 형태

그림 3.4는 제안한 제어 방법에서 저장 장치의 입 출력 전류의 형태에 대한 이해를 돕기 위해 나타낸 개략도이다. SIU의 인덕터 전류는 120 Hz의 주파수를 갖는 교류 형태를 띄며 I_{Bat_ave} 를 기준으로 $I_{Load} - I_{RIU} - I_{Bat_ave}$ 를 진폭으로 갖는다. 이때 최대 진폭은 GIU의 출력 커패시터에서 감쇄된 전류 리플을 제외한, GIU의 입력 전류와 비슷한 값을 갖는다. 이때문에

SIU에 연결된 배터리의 충전 및 방전 시 실제 평균 전류에 비해 높은 Root mean square (rms) 전류를 발생시키고 내부 저항으로 인한 손실 및 열을 발생시킨다.

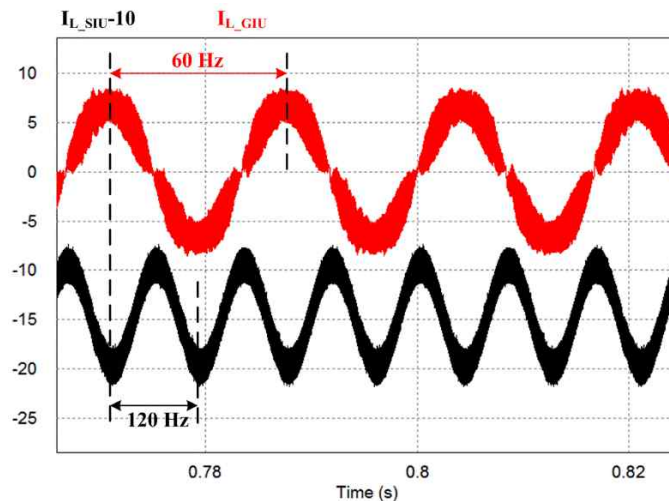


그림 3.5 GIU와 SIU의 인덕터 전류 모의 실험 파형

그림 3.5는 GIU와 SIU를 연결했을 때의 모의 실험 파형으로 GIU 인덕터 전류와 SIU의 인덕터 전류를 나타낸다. GIU는 역률 보상 동작을 하기 때문에 전류가 60 Hz 입력 교류 전압을 따라가며 SIU는 빠른 전압 제어 대역폭을 통해 GIU의 정류기 동작으로 인해 120 Hz로 주파수로 바뀐 전류를 흡수한다. 이 때 SIU의 전류 진폭이 배터리 내부의 열을 발생시켜 수명에 문제를 일으킬 수 있다는 주장이 있으므로, 이 문제를 줄이기 위해 저장 장치 구성을 배터리 단독이 아닌 슈퍼 커패시터 또는 전해 커패시터를 병렬로 사용하는 방안을 고려한다.

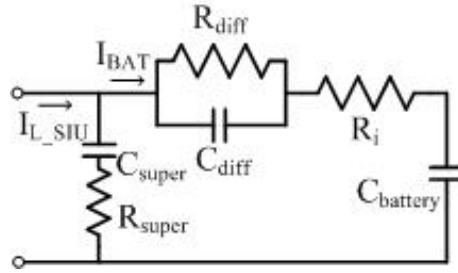


그림 3.6 배터리와 슈퍼-커패시터 연동 구조

그림 3.6은 배터리와 슈퍼-커패시터를 병렬로 연결한 구조를 나타낸다. 배터리의 분산 RC 구조(Diffusion RC ladder)는 120 Hz 성분에 대한 것만 남겨두고 모두 제외시켰다. 이렇게 저장 장치를 구성 할 경우 앞의 슈퍼-커패시터는 배터리 입력 전류의 1차 필터 역할을 하게 되며 이 효과는 그림 3.7에서 보는 것과 같이 배터리의 직류 성분 저항 R_i 와 슈퍼 커패시터의 C_{super} 값에 따른 차단 주파수를 갖는 1차 필터가 되며, 이 값을 통해 120 Hz 입력 전류 리플의 감쇄가 가능하다.

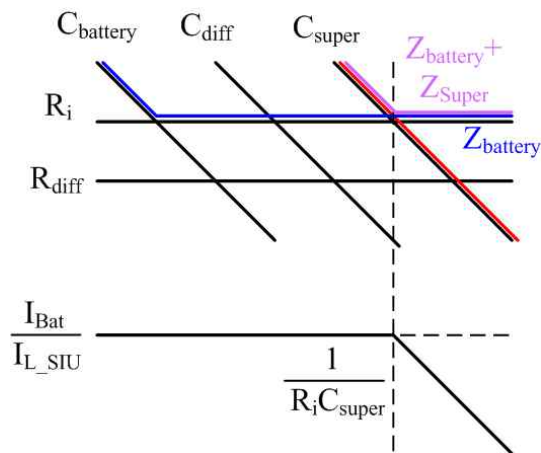


그림 3.7 슈퍼-커패시터의 1차 필터 개념도

이 특성을 이용하여 배터리의 용량 및 특성에 따라 사용할 최소 슈퍼-커패시터의 용량을 결정 할 수 있으며 본 논문에서는 표 3.1에 기입된 배터리 셀을 이용하여 구성된 배터리 스택을 사용한다. 1 kW급 시스템을 꾸미기 위해 저장 장치를 54직렬 - 2병렬로 구성할 경우 200 V, 5.2 Ah의 스택이 구성되며, 이때 스택 구성된 배터리의 입력 저항값인 R_i 의 값은 8.232Ω 으로 이 값을 기준으로 최소 C_{super} 를 구해 배터리와 병렬로 사용한다.

표 3.1 사용한 배터리 1-cell당 상세 사양

	Li-Ion battery(1 cell)
Typical voltage	3.7 V
Maximum volate	4.5 V
Minimum voltage	2.8 V
Capacity	2.6 Ah
$C_{battery}$	421200 F
R_i	0.1524Ω
C_{diff}	6980 F
R_{diff}	0.0538Ω

그림 3.8은 해당 배터리와 출력으로 470 uF 용량의 전해 커패시터를 병렬로 사용한 경우의 모의 실험 결과이다. SIU의 인덕터 전류와 배터리의 입력 전류의 비교를 통해, 배터리 입출력 전류 리플의 감쇄 효과를 확인 가능하다.

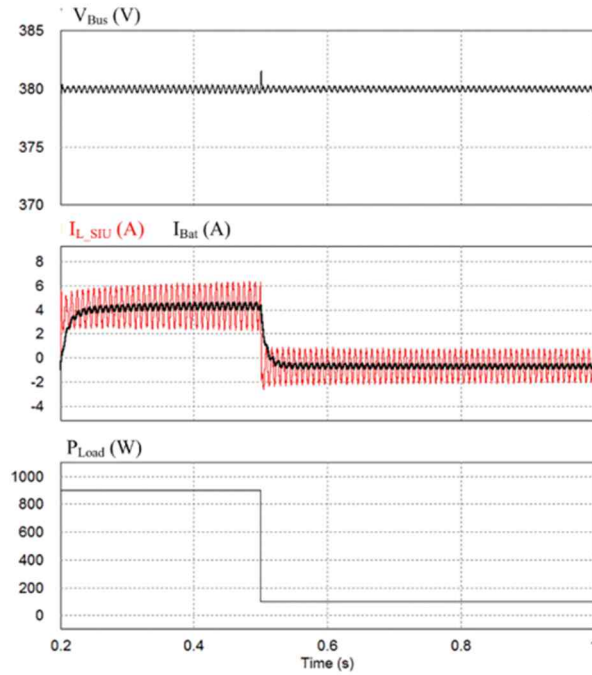


그림 3.8 출력 단계 전하 캐패시터를 사용한 경우의 모의 실험 결과

3.2 개별 요소의 소신호 분석 및 제어기 설계

본 장에서는 각 전력 변환 회로가 다양한 모드에서 안정적으로 동작하기 위한 제어기 설계와 신뢰성 확보를 위한 안정도 판별을 위해 소신호 모델을 분석한다. 이를 위해 각 전력 변환 회로의 정상 상태에서 시스템을 선형화해 전달 함수를 구하는 State space averaging 방식[54, 91, 92]을 이용하며, 이를 통해 구한 소신호 모델을 바탕으로 각 하위 시스템을 안정적으로 동작시키기 위한 전압 및 전류 제어기를 설계한다. 또한 향후 안정성 분석을 위해 필요한 오픈 루프 상태에서 회로의 다른 정상 상태

분석 관련 수식들 역시 함께 정리하도록 한다.

또한 각 회로의 동작은 DSP를 통해 구현되며, 이에 따라 소신호 모델은 Zero-Order Hold (ZOH) 방식을 이용해 이산 시간 함수로 변경하여 사용하도록 하며[93], 샘플링 값이 실제 반영되는 시간에 대한 스위칭 시간 지연을 추가하여 제어 루프에 포함시키도록 한다.

3.2.1 RIU

3.2.1.1 소신호 분석

표 3.2 RIU의 각 소자 및 전원 특성

항목	값	비고
L_{RIU}	1 mH	
C_o	100 μ F	
r_C	0.1 Ω	
C_{PV}	940 μ F	
r_{Cpv}	0.1 Ω	
V_{PV}	200 V	Maximum power point voltage
	250 V	Open circuit voltage
I_{PV}	5 A	Maximum power point current
	6 A	Short circuit current

표 3.2는 RIU의 각 소자 값 및 전원단 태양광 패널의 특성을 나타낸 표이다. 이 값을 기반으로 그림 3.9과 같이 태양광 시뮬레이터를 포함한 단 방향 부스트 회로를 이용하여 RIU를 구성하였다. 태양광 패널은 생산만이 가능한 발전기의 역할이기 때문에 양 방향을 고려하지 않으며 소신호 모델링은 연속 전류 모드(CCM) 조건을 기반으로 진행한다.

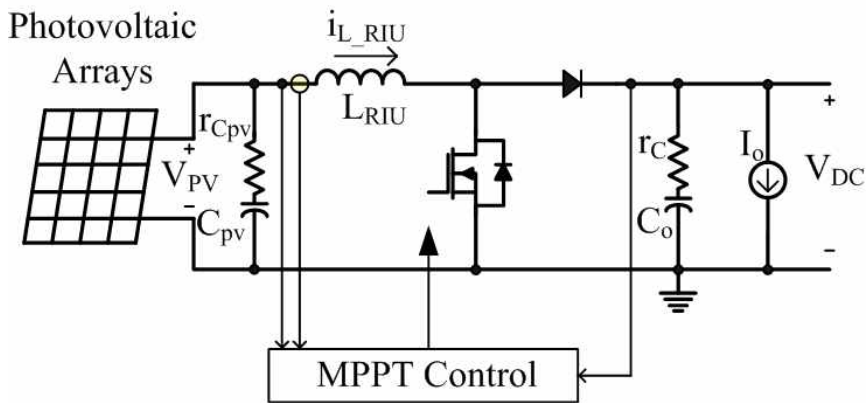


그림 3.9 태양광용 부스트 전력 변환 회로

RIU는 모든 조건에서 MPPT 동작을 진행하도록 계산되었으며 따라서 태양광 패널의 최대 전력 추종을 위해 직류 배전 선로의 전압이 아닌 패널 입력 전압을 제어한다. 이를 위해 V_{DC} 는 다른 전력 변환 회로들에 의해 안정적으로 제어된다는 가정이 필요하며, V_{DC} 를 입력으로 V_{PV} 를 제어하기 위한 모델링이 된다.

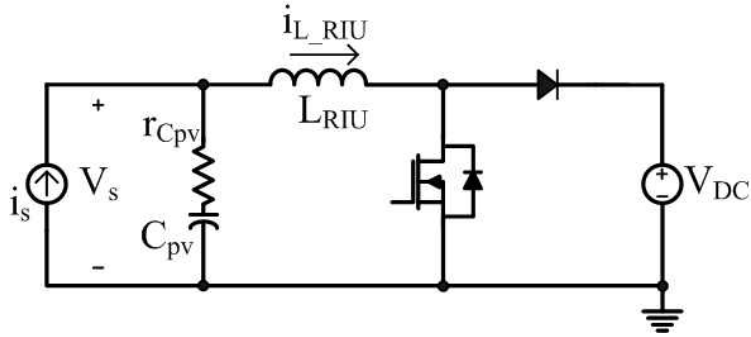


그림 3.10 MPPT 동작 상황에서 RIU의 증가 회로

이를 증가 모델로 표현하면 그림 3.10처럼 나타낼 수 있으며, State space averaging을 이용한 소신호 모델링은 스위치가 도통(ON) 상태일 때와 차단(OFF) 상태일 때 인덕터 전류와 커패시터의 전압을 미분 방정식으로 표현하는 것부터 시작한다. 식 (3.1)과 식 (3.2)는 각각 도통 및 차단 상태에서의 미분 방정식을 나타낸다.

$$L_{RIU} \frac{di_{L_RIU}}{dt} = v_{Cpv} + r_{Cpv}(i_s - i_{L_RIU}) \quad (3.1)$$

$$C_{pv} \frac{dv_{Cpv}}{dt} = i_s - i_{L_RIU}$$

$$L_{RIU} \frac{di_{L_RIU}}{dt} = v_{Cpv} + r_{Cpv}(i_s - i_{L_RIU}) - v_{DC} \quad (3.2)$$

$$C_{pv} \frac{dv_{Cpv}}{dt} = i_s - i_{L_RIU}$$

스위칭 한 주기에서 스위치가 도통되는 구간을 d , 차단 되는 구간을 $d' (=1-d)$ 라고 할 때 위 식은 식 (3.3)처럼 한 주기에 대한 평균화한 상태 방정식으로 나타낼 수 있으며, 이를 통해 입력 변수들의 작은 섭동(perturbation)에 대한 출력의 선형화 함수를 풀게 되면 식 (3.4)와 같은 전달 함수를 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_RIU} \\ \dot{v}_{Cpv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{Cpv}}{L_{RIU}} & \frac{1}{L_{RIU}} \\ -\frac{1}{C_{pv}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_RIU} \\ v_{Cpv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_{Cpv}}{L_{RIU}} & -\frac{d'}{L_{RIU}} \\ \frac{1}{C_{pv}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ v_{DC} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$G_{ii} = \frac{1 + sr_{Cpv}C_{pv}}{\Delta} \quad : i_s \text{ to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vi} = \frac{sL_{RIU}(1 + sr_{Cpv}C_{pv})}{\Delta} \quad : i_s \text{ to } v_s$$

$$G_{ig} = -D' \frac{sC_{pv}}{\Delta} \quad : v_{dc} \text{ to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vg} = D' \frac{1 + sr_{Cpv}C_{pv}}{\Delta} \quad : v_{dc} \text{ to } v_s$$

$$G_{id} = \frac{sC_{pv}V_{DC}}{\Delta} \quad : \text{duty to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vd} = -V_{DC} \frac{1 + sr_{Cpv}C_{pv}}{\Delta} \quad : \text{duty to } v_s$$

$$\Delta = 1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}, \quad Q = \frac{1}{r_{Cpv}} \sqrt{\frac{L_{RIU}}{C_{pv}}}, \quad \omega_o = \sqrt{\frac{1}{L_{RIU}C_{pv}}} \quad (3.4)$$

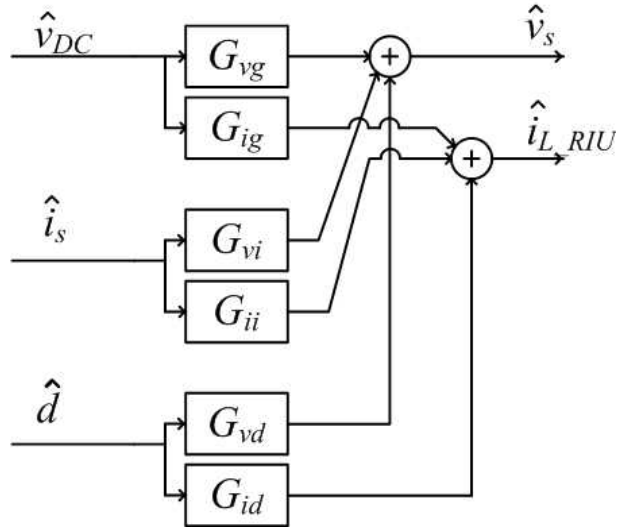


그림 3.11 RIU의 MPPT 제어 시 소신호 블록도

하지만 태양광 패널은 그림 3.12처럼 비선형성을 가진 전원으로 이상적인 전압원 혹은 전류원이 아니기 때문에 전달함수에 영향을 주며 이를 고려한 전달함수는 식 (3.5)-(3.7)과 같이 동작점에 대한 테일러 급수를 이용해 얻을 수 있다.

$$i_s = f(v_s) \quad (3.5)$$

$$I_s + \hat{i}_s = f(V_s + \hat{v}_s) = f(V_s) + \dot{f}(V_s) \cdot \hat{v}_s \quad (3.6)$$

$$\hat{i}_s = r_{sa} \hat{v}_s \quad (3.7)$$

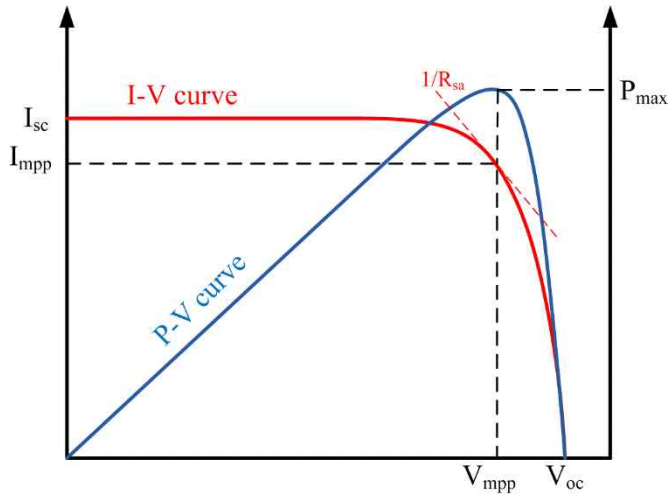


그림 3.12 태양광 패널의 특성 곡선

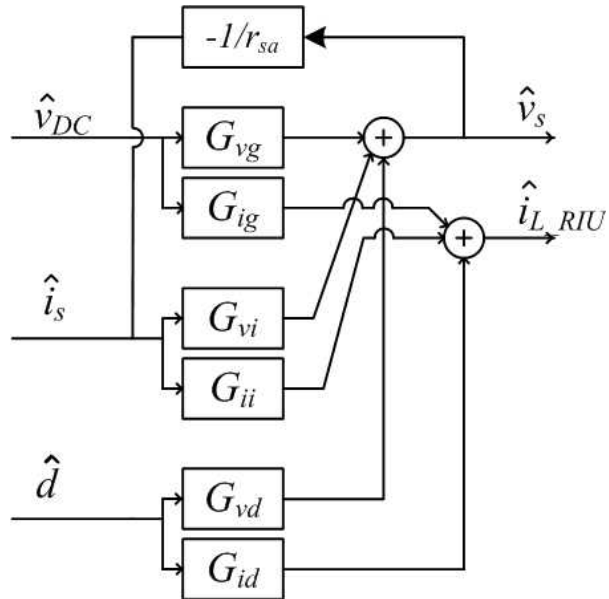


그림 3.13 태양광 패널이 연결된 RIU의 소신호 블록도

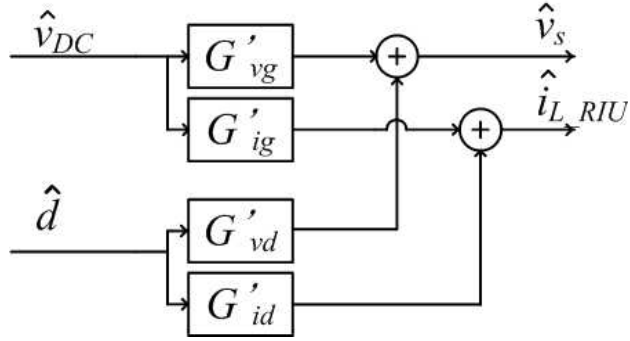


그림 3.14 태양광 패널이 연결된 RIU의 간략화한 소신호 블록도

여기서 얻은 순시적 저항 r_{sa} 를 이용해 그림 3.13처럼 소신호 블록도를 다시 구성 할 수 있으며 이를 간략화해서 다시 소신호 블록도를 그리면 그림 3.14를 얻을 수 있으며, 이에 따라 소신호 전달 함수를 식 (3.8)과 같이 재정리 가능하다.

$$G'_{ig} = G_{ig} - \frac{G_{ii}}{r_{sa}} \frac{G_{vg}}{1 + T_{sa}}$$

$$G'_{vg} = \frac{G_{vg}}{1 + T_{sa}}$$

$$G'_{id} = G_{id} - \frac{G_{ii}}{r_{sa}} \frac{G_{vd}}{1 + T_{sa}}$$

$$G'_{vd} = \frac{G_{vd}}{1 + T_{sa}}$$

$$\text{Where, } T_{sa} = \frac{G_{vi}}{r_{sa}} \quad (3.8)$$

3.2.1.2 제어기 설계

RIU는 $C_{pv}=940\text{ }\mu\text{F}$, $L_{RIU}=1\text{ mH}$ 의 조건에서 설계되었으며 입력 전압 V_{DC} 는 380 V로 마스터 전력 변환 회로에 의해 제어되고 있고, 태양광 패널은 200 V, 5 A의 조건에서 최대 출력을 갖는 1 kW급 전력 변환 회로로 가정하여 설계한다.

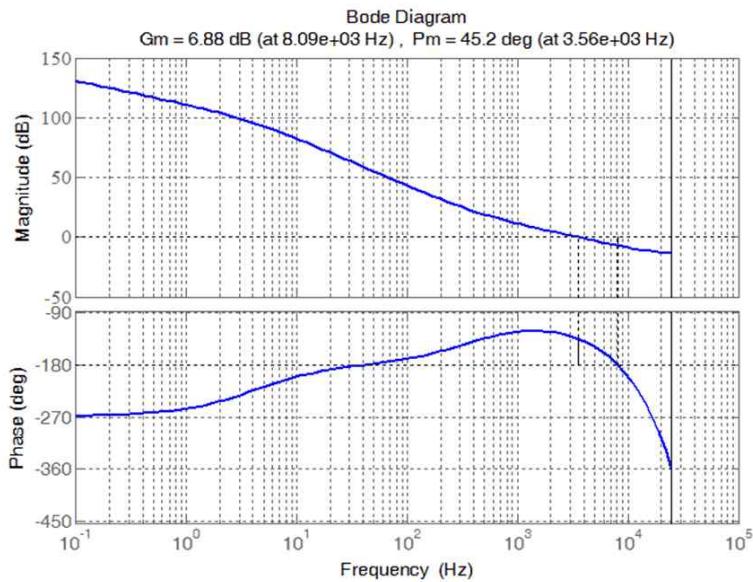


그림 3.15 RIU의 전류 루프 보드 선도

앞 절에서 구한 소신호 모델을 이용해 전류 약 3.56 kHz의 차단 주파수와 45.2°의 위상 이득을 갖는 전류 제어기를 식 (3.9)처럼 설계하였으며 이때 전류 루프의 보드 선도는 그림 3.15와 같다.

$$H_{i_RIU}(z) = 0.0594 \times \frac{z - 0.9513}{z - 1} \quad (3.9)$$

설계한 전류 루프를 기반으로 정상상태 동작점인 $r_{sa} = -0.025 \Omega$ 를 기반으로 식 (3.10)과 같은 전압 제어기를 설계하였으며 이에 따른 RIU의 전압 루프 보드 선도는 그림 3.16에 나타나듯이 587 Hz의 차단 주파수와 127°의 위상 이득을 갖는다.

$$H_{v_RIU}(z) = 5.878 \times \frac{z - 0.965}{z^2 - 1.834z + 0.8338} \quad (3.10)$$

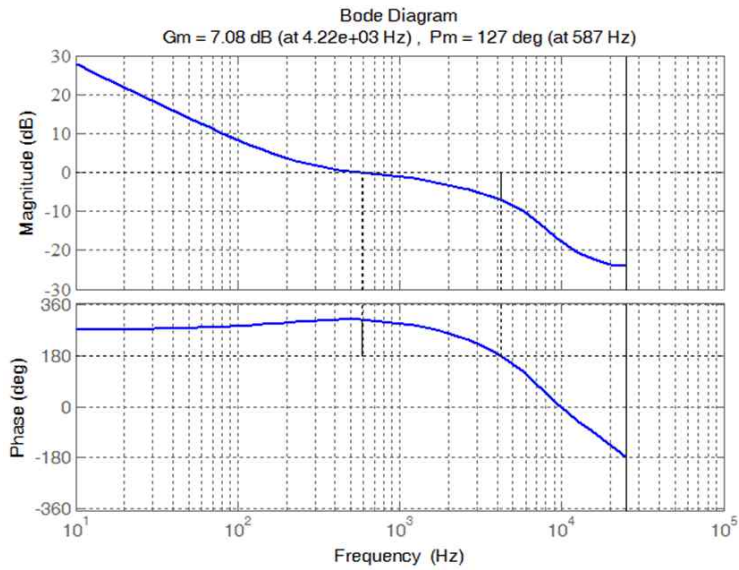


그림 3.16 RIU의 전압 루프 보드 선도

RIU는 앞서 언급했듯이 비 제어형 슬레이브이기 때문에 기존 시스템과 동작에서의 특이성은 없다. 따라서 개별 동작 모의 실험 결과를 포함하지 않도록 한다.

3.2.2 GIU

3.2.2.1 소신호 분석

표 3.3 GIU 각 소자 특성

항목	값	비고
L_{GIU}	4 mH	
C	940 μ F	
r_C	0.1 Ω	
V_{AC}	220 V _{rms} 60 Hz	220 V - 60 Hz 교류 계통 전압

표 3.3은 GIU를 구성하는 각 소자의 값을 나타내었으며, GIU는 직류 배전 선로와 외부 교류 계통을 연결하기 위해 그림 3.17과 같이 단상 풀 브리지 회로를 사용하였다. 교류 계통과 연결된 컨버터는 양방향 전력 전달이 가능해야 하며 마스터-슬레이브 제어 상태에서도 드롭 제어 상태에서 동작이 다르지만 소신호 모델링과 제어기 설계 과정은 동일하다.

해당 단상 H-Bridge 회로는 스위칭 방법에 따라 스위치 전압이 2-레벨로 나타나는 Bipolar PWM 방식과 3-레벨로 나타나는 Unipolar PWM 방식이 있는데, 본 논문에서는 Unipolar 방식을 사용하였으며, 이에 따른 소신호 분석 과정은 아래와 같다.

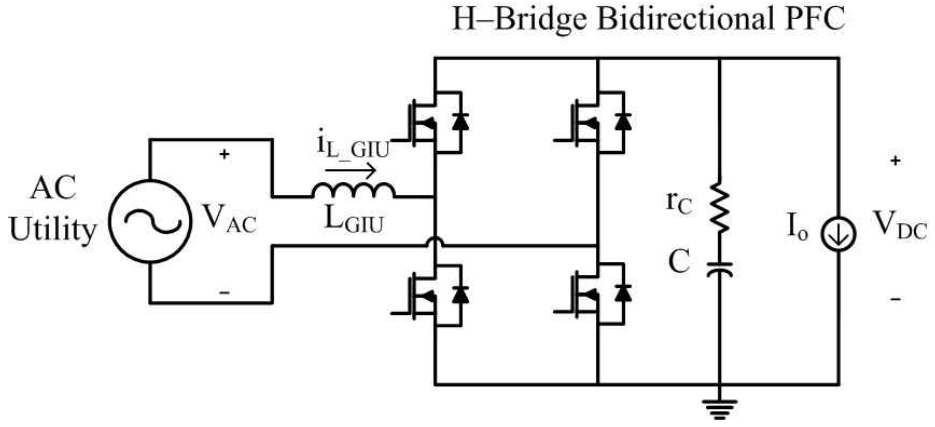


그림 3.17 교류 계통과 연계를 위한 단상 풀 브릿지 회로

$$\begin{bmatrix} i_{L_GIU} \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_C D_{ab}}{L_{GIU}} & \frac{D_{ab}}{L_{GIU}} \\ -\frac{D_{ab}}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_GIU} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{GIU}} & \frac{r_C D_{ab}}{L_{GIU}} \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ac} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$G_{ii} = \frac{1 + sr_C C}{\Delta} \quad : i_s \text{ to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vi} = \frac{r_C D_{ab}}{D_{ab}} \cdot \frac{(1 - \frac{sL_{GIU}}{r_C D_{ab}})(1 + sr_C C)}{\Delta} \quad : i_s \text{ to } v_s$$

$$G_{ig} = -\frac{1}{D_{ab}^2} \frac{sC}{\Delta} \quad : v_{dc} \text{ to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vg} = \frac{1}{D_{ab}} \frac{1 + sr_C C}{\Delta} \quad : v_{dc} \text{ to } v_s$$

$$G_{id} = \frac{-2I_o}{D_{ab}^2} \frac{1 + s(\frac{r_C CD}{D_{ab}} - \frac{CV_{DC}}{I_o})}{\Delta} \quad : \text{duty to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vd} = -\frac{2L_{GIU}C}{D_{ab}^2} \left[\frac{1}{L_{GIU}C} (r_c I_o D_{ab} + D_{ab} V_{DC}) + s \frac{I_o}{CD_{ab}} \right] \frac{1 + sr_c C}{\Delta}$$

: duty to v_s

$$\Delta = 1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}, \quad Q = \frac{1}{r_c} \sqrt{\frac{L_{GIU}}{C}}, \quad \omega_o = \sqrt{\frac{D_{ab}^2}{L_{GIU}C}}, \quad D_{ab} = 2D - 1 \quad (3.12)$$

식 (3.11)은 스위치의 ON, OFF상태를 평균화한 상태 방정식이며 식 (3.12)는 이를 통해 유도한 소신호 전달 함수를 나타낸다. 마스터-슬레이브 동작 모드만을 신경 쓸 경우 전압 정보에 대한 모델링 및 그와 관련된 분석은 필요 없지만 사고 상황에서 드롭 제어를 가정하고 제어기를 설계해야 하기 때문에 전압 관련 소신호 모델 역시 동일하게 진행한다.

3.2.2.2 제어기 설계

GIU는 입력이 220 V 교류 전압이며 출력은 SIU에서 제어하는 380 V 전압에 연결되어 있으며 정상 동작 시 슬레이브 역할을 한다. 회로는 4 mH의 인덕터와 940 uF의 출력 커패시터를 갖고 있으며 이를 기반으로 제어기 설계를 진행한다.

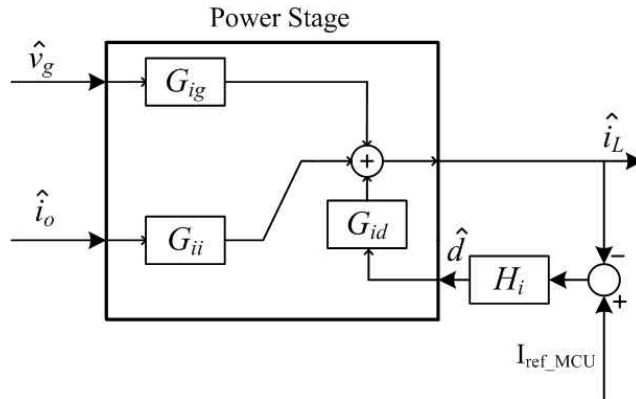


그림 3.18 정상 동작 모드에서 GIU의 소신호 블록 다이어그램

그림 3.18은 마스터-슬레이브 동작 모드에서 GIU의 소신호 블록 다이어그램으로 이 모드에서 GIU는 배전 선로 전압 안정화가 아닌 상위 제어기에서 전달하는 전류 지령치에 따라 인덕터의 전류를 제어하여 입력 에너지 양을 조절한다. 따라서 해당 모드에서 GIU는 전류 제어기만을 통해 동작하며, 전류 제어 루프는 G_{id} 와 전류 제어기 H_i 에 의해서만 결정된다. 출력 전압 제어는 하지 않지만 소신호 모델 분석을 위해서는 입 출력 전압에 대한 정상 상태 동작 값이 필요하기 때문에 출력 전압은 SIU에 의해 잘 제어되고 있다는 가정을 기반으로 모델링이 진행되었다.

$$H_i(z) = 0.03655 \times \frac{z - 0.9746}{z - 1} \quad (3.13)$$

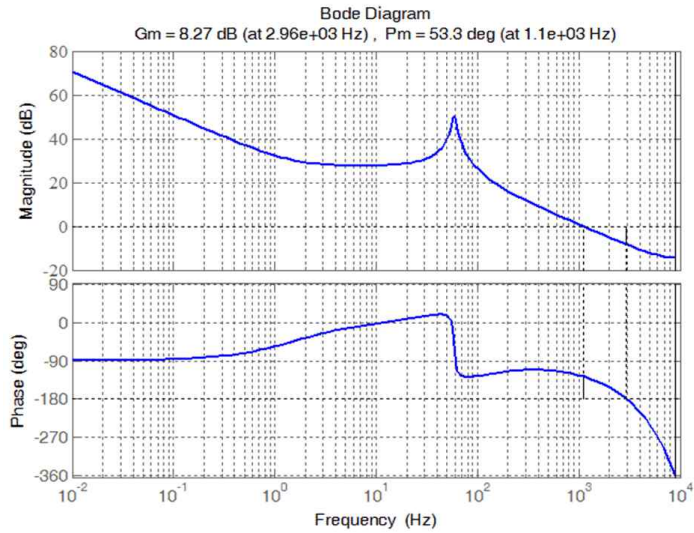


그림 3.19 GIU의 전류 루프 보드 선도

식 (3.13)과 그림 3.19는 각각 전류 제어기의 수식과 전류 루프의 보드 선도를 나타낸다. 전류 제어기는 약 1.1 kHz 의 차단 주파수와 53.3° 의 위상 이득을 갖도록 설계되었다.

마스터-슬레이브 동작 조건만을 고려할 경우 전류 제어기 및 전류 루프에 대한 안정성만 고려해도 되지만, 마스터나 통신 사고 시를 위한 드롭 제어를 포함 할 경우 추가적인 전압 제어기의 설계가 필요하다.

$$H_{v_GIU(droop)} = 0.04688 \times \frac{z - 0.9981}{z - 1} \quad (3.15)$$

$$T_v = \frac{T_i}{1 + T_i} \frac{G_{vd}}{G_{id}} H_v \quad (3.16)$$

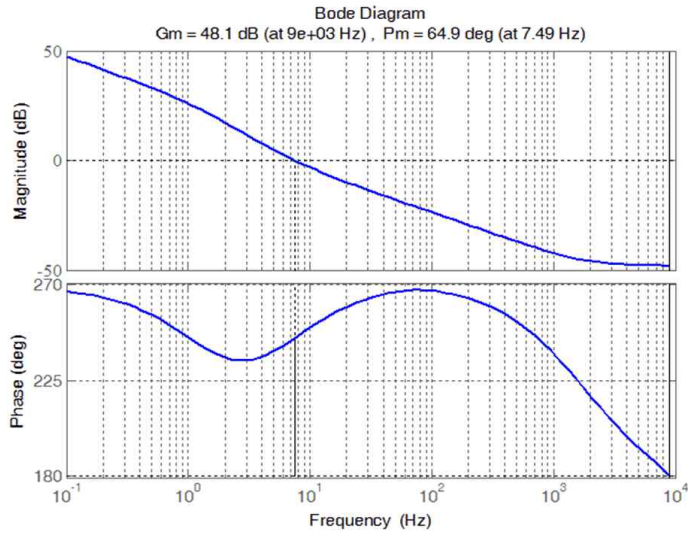


그림 3.21 GIU 드롭 제어 시 전압 제어 루프 보드 선도

다중화기는 배전 선로의 전압이 일정 범위 이상 벗어날 경우 드롭 제어기가 동작하도록 그림 3.22처럼 구현한다. 배전 선로 전압 이탈 구간 범위는 ± 10 V로 정하여 일반적인 과도 상태 전압 변동에 의해서는 동작하지 않도록 한다. 또한 배전 선로 전압의 변동에 대한 DBS 슬레이브 동작을 위한 블록 역시 추가 한다.

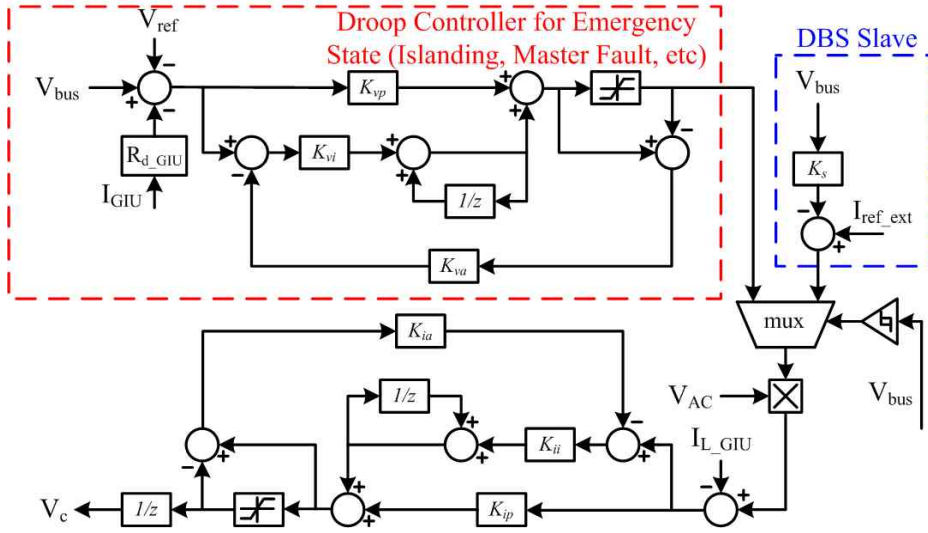


그림 3.22 다중화기 및 GIU 제어기 동작 개념도

본 논문에서는 DBS 동작으로 인한 배전 선로 전압의 최대 변동 폭을 $\pm 5V$ 로 한정한다. 또한 시스템의 최대 부하와 GIU의 최대 공급 전력을 1 kW로 구성하며, 이에 따라 DBS 슬레이브 커브의 기울기는 식 (2.4)에 기반하여

$$K_s = -200 \quad (3.17)$$

으로 선정한다. 해당 기울기는 전력량에 대한 기울기이며, 이를 전류 제어기에 포함시키기 위해서는 이 값을 입력 전압으로 나눈 값을 사용해야 한다.

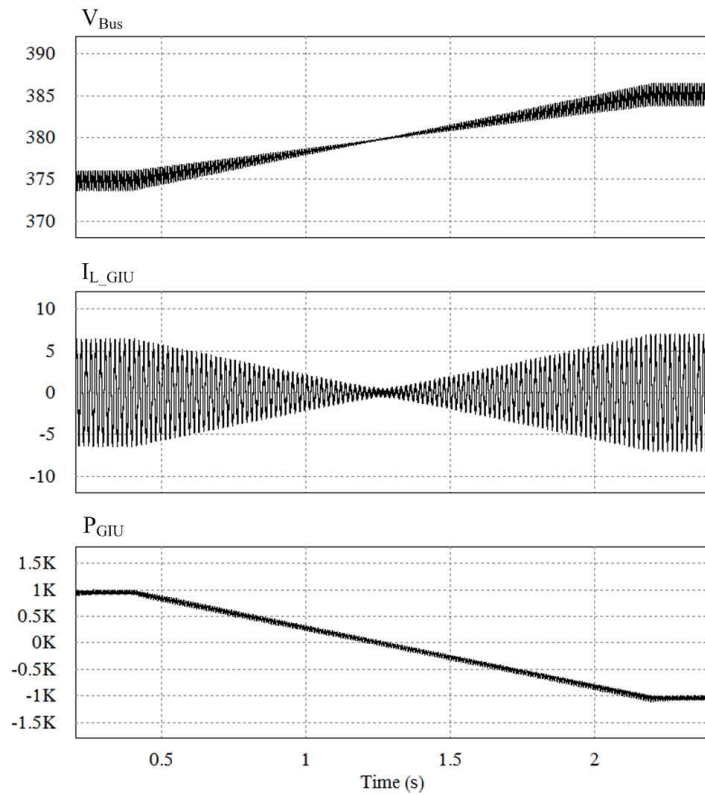


그림 3.23 DBS 마스터-슬레이브 제어가 적용된 GIU의 기본 동작 모의 실험
파형

그림 3.23은 DBS 마스터-슬레이브 제어가 적용된 GIU의 모의 실험 파형이다. 배전 선로 전압이 375 V에서 385 V로 변동되면서 이 입력을 받아 GIU의 인덕터 전류 값을 바꿔 제어한다. 이에 따라 GIU를 통해 배전 선로로 전달되는 에너지의 양이 변동된다. 하지만 이러한 제어는 배전 선로 임피던스나 센싱 오차에 의해 발생하는 전압 왜곡 및 전류 왜곡으로 인해 오차가 발생 할 수 있으며, 이에 대해 보정하는 방법은 다음 장에서 다루도록 한다.

3.2.3 SIU

3.2.3.1 소신호 분석

표 3.4 SIU의 소자와 전원 특성

항목	값	비고
L_{RIU}	1 mH	
C_{SIU}	100 μ F	
r_C	0.1 Ω	
OCV	150 ~250 V	Open circuit voltage range of the battery
R_i	8.232 Ω	Input resistance of the battery
R_{diff}	2.9052 Ω	Diffusion resistance of the battery
C_{diff}	129.26 μ F	Diffusion capacitance of the battery
$C_{battery}$	7800 F	Main capacitance of the battery

표 3.4는 SIU의 소자 값 및 배터리의 세부 특성을 나타내며, 그림 3.24은 시스템 구축을 위해 제작된 배터리를 포함한 동기 부스트 컨버터를 나타낸다. SIU는 양방향 전력 전달이 가능하며 마스터로서 빠른 동 특성을 갖도록 하기 위해 전압 및 전류 제어를 모두 하도록 설계되었으며 저장 장치의 충전 및 방전 조절을 통해 배터리 SoC 수준을 결정하는 것은 상위 제어기와 이 상위 제어기를 통한 GIU의 전류 지령치를 통해 결정하도록 한다.

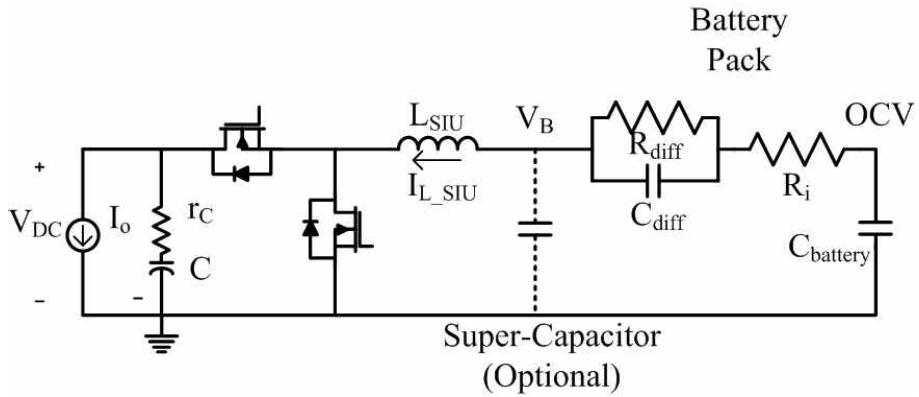


그림 3.24 저장 장치용 동기 부스트 컨버터 회로

배터리가 포함된 모델을 통한 소신호 모델링은 너무 복잡하기 때문에 저장 장치는 스위칭 주기 동안 이상적인 전압 원으로 가정하여 분석을 진행한다. 이에 따른 등가 모델 회로는 그림 3.25처럼 나타낼 수 있다.

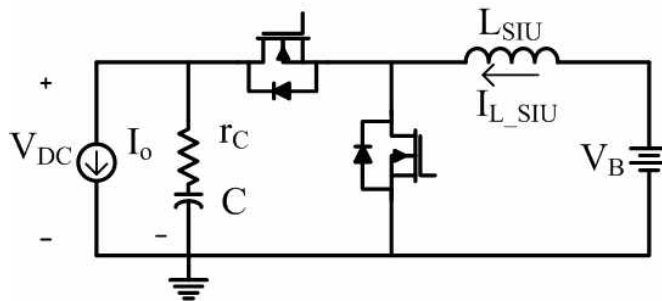


그림 3.25 SIU의 등가 모델 회로

이전과 동일한 방식으로 미분 방정식을 구해 평균화한 상태 방정식을 구하면 식 (3.18)을 얻을 수 있으며, 이를 통한 섭동에 대한 선형화된 소신호 모델은 식 (3.19)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_SIU} \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_C D'}{L_{SIU}} & -\frac{D'}{L_{SIU}} \\ \frac{D'}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_SIU} \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{SIU}} & \frac{r_C D'}{L_{SIU}} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_B \\ i_o \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$G_{ii} = \frac{1}{D'} \frac{1 + sr_C C}{\Delta} \quad : i_s \text{ to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vi} = \frac{r_C (D' - 1)}{D'} \frac{\left(1 - \frac{s L_{SIU}}{r_C (D' - 1)}\right) (1 + sr_C C)}{\Delta} \quad : i_s \text{ to } v_s$$

$$G_{ig} = \frac{1}{D'^2} \frac{sC}{\Delta} \quad : v_{dc} \text{ to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vg} = \frac{1}{D'} \frac{1 + sr_C C}{\Delta} \quad : v_{dc} \text{ to } v_s$$

$$G_{id} = \frac{I_o}{D'^2} \frac{1 + s \left(\frac{r_C CD}{D'} + \frac{CV_{DC}}{I_o} \right) r_C C}{\Delta} \quad : \text{duty to } i_{L_RIU}$$

$$G_{vd} = -\frac{r_C I_o D' - D' V_{DC} + \frac{s L_{SIU} I_o}{D}}{D'^2} \frac{1 + sr_C C}{\Delta} \quad : \text{duty to } v_s$$

$$\Delta = 1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}, \quad Q = \frac{1}{r_C} \sqrt{\frac{L_{SIU}}{C}}, \quad \omega_o = \sqrt{\frac{D'^2}{L_{SIU} C}} \quad (3.19)$$

3.2.3.2 제어기 설계

앞 절에서 설계한 저장 장치 구성대로 SIU의 입력 전압은 최저 150 V에서 최대 240 V까지 변화하며 인덕터의 값은 1 mH, 출력 커패시터의 값은 100 uF를 사용하였다. SIU는 정상 동작 시에는 마스터로서 배전

그림 3.27은 SIU 전류 루프의 보드 선도를 나타낸 것이며 식 (3.20)은 이때 사용된 전류 제어기의 수식을 나타낸 것이다. SIU의 전류 루프는 약 8.56 kHz에 해당하는 차단 주파수와 26.4° 의 위상 이득을 갖도록 설계되었다.

76

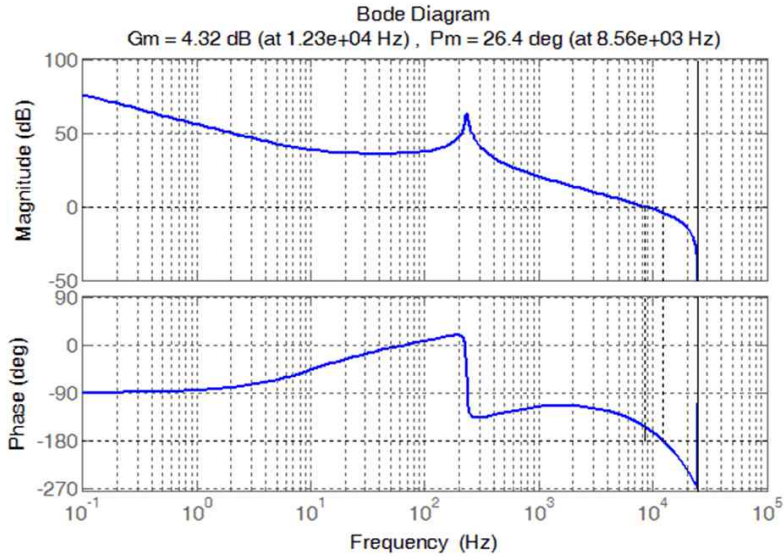


그림 3.27 SIU 전류 루프의 보드 선도

이 전류 루프를 이용해 외부의 전압 루프를 식 (3.21)처럼 설계하여 전체 전압루프의 보드 선도는 그림 3.28처럼 나타낼 수 있다. 전류 루프의 제어 대역폭이 약 8.5 kHz인 관계로 SIU의 전압 제어기는 간섭을 피하기 위해 전류 대역폭의 1/5 인 1.7 kHz 이하의 값으로 설계한다. SIU는 배전 선로 전압의 제어를 맡는 마스터이기 때문에 전압 제어 대역폭을 최대한 높이는 것이 유리하며, 이에 따라 SIU의 전압 제어기는 약 1.6 kHz의 차단 주파수를 가지며 62° 의 위상 이득을 갖도록 설계되었다.

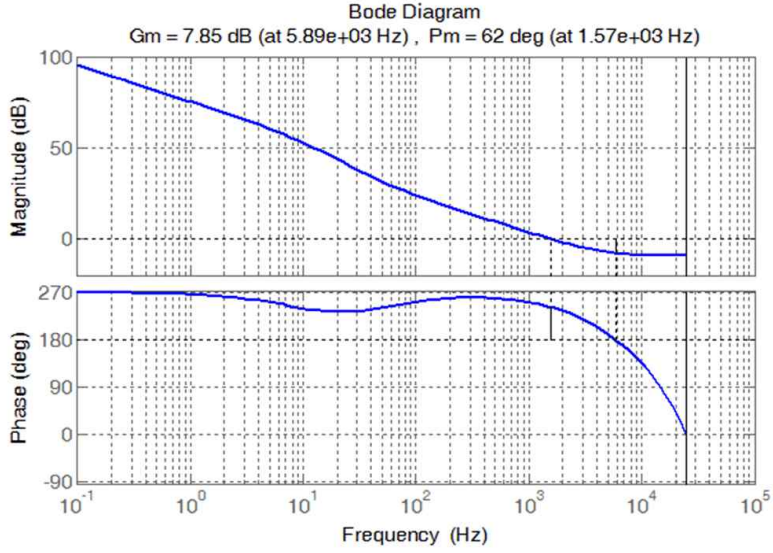


그림 3.28 SIU 전압 루프의 보드 선도

$$H_{v_SIU}(z) = 1.374 \times \frac{z - 0.9942}{z - 1} \quad (3.21)$$

SIU 역시 DBS 마스터 커브에 대한 모델이 포함되어야 하며, 이 구성은 그림 3.29처럼 표현할 수 있다. 저장 장치의 전압을 센싱하여 얻은 SoC 값에 기울기인 K_m 값을 곱해 배전 선로 전압 레퍼런스 값이 포함시켜 주며, 식 (2.3)에 따라 결정된 K_m 의 값은

$$K_m = 12.5 \quad (3.22)$$

처럼 얻을 수 있다. 저장 장치의 SoC 사용 범위를 10 % 에서 90 %까지로 보고 이에 따른 배전 선로 전압 변동 범위를 $\pm 5V$ 로 놓았을 경우이다.

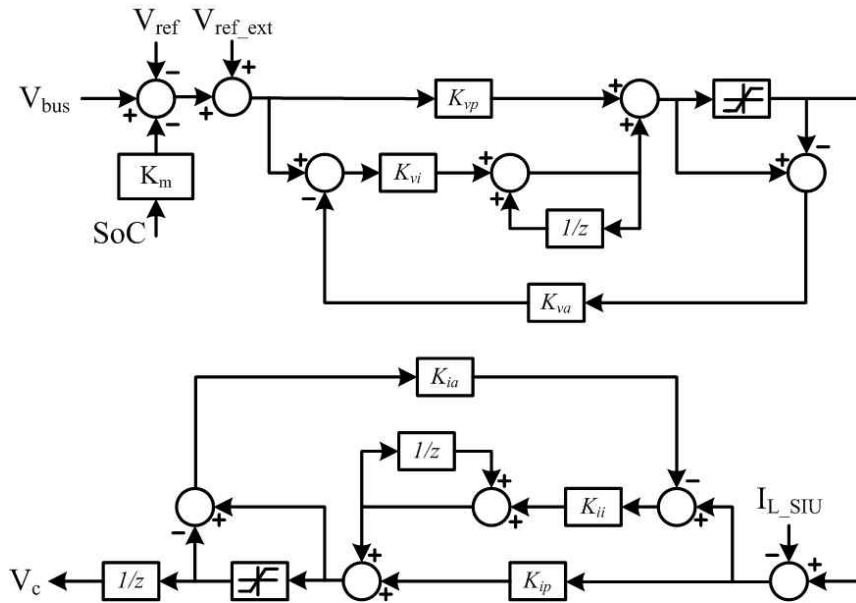


그림 3.29 SIU의 제어기 구성 블록도

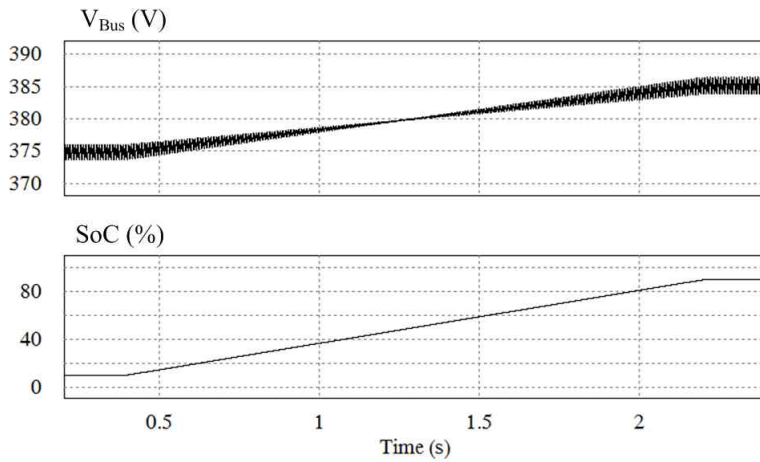


그림 3.30 DBS 마스터-슬레이브가 적용된 SIU의 모의 실험 파형

그림 3.30는 해당 제어 방식이 적용된 SIU의 모의 실험 파형이다. 설계한 대로, SoC가 10 %에서 90 %로 변경되면서 배전 선로 전압을 375 V에서 385 V로 변경하여 제어한다.

제 4 장 제안한 운용 방안의 안정도 판별 및 과도 특성 해석

4.1 제안한 시스템의 안정도 해석

직류 배전 시스템은 여러 분산 전원이 연결되어 있기 때문에 개별 서브 시스템이 안정적으로 설계되었어도 시스템 통합 시 서로의 간섭 및 부하의 비선형성에 의해 안정도에 영향을 받을 수 있다. 따라서 시스템의 안정도 해석은 시스템 설계의 안정성 및 신뢰성을 보장하기 위한 최 우선 고려사항이다. 본 절에서는 이 안정도 판별 기준을 살펴보고 안정도 확보를 위해 필요한 시스템의 설계 기준을 제시한다.

4.1.1 안정도 판별법

시스템 안정도 분석을 위해서 다양한 연구 및 안정도 판별법이 존재하며 그 중 가장 대표적인 방법이 임피던스 보드 선도를 이용한 Cho's 판별법[54, 55] 이다. 이 방법은 그림 4.1에서처럼 각각 안정적으로 설계된 하위 시스템을 이용하여 전원단과 부하단을 구분하여 접근하는 방법으로 전체 입출력 전달함수를 이용해 각 하위 시스템의 입출력 임피던스 비율에 해당하는 값을 통해 안정도를 판별하며 이를 수식으로 표현하면 식 (4.1)처럼 나타난다.

$$F_{AB} = \frac{V_{1B}}{V_{1A}} = \frac{V_{2A}}{V_{1A}} \frac{V_{1B}}{V_{2B}} \left(1 / \left(1 + \frac{Z_{oA}}{Z_{oB}} \right) \right) \quad (4.1)$$

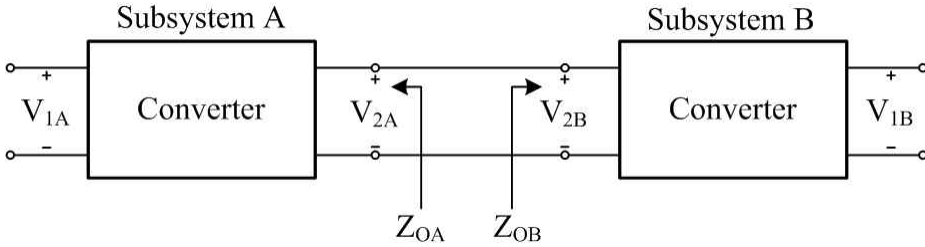


그림 4.1 직렬 연결된 두 하위 시스템

이때 V_{2A}/V_{1A} 와 V_{1B}/V_{2B} 는 무 부하 시 하위 시스템의 전달함수를 의미하며 각 하위 시스템이 안정적으로 설계되었다고 가정할 경우 시스템의 안정도는 $1+(Z_{oA}/Z_{oB})$ 에 의해 결정된다. 이는 두 시스템간의 부하 효과를 나타내며 이때 Z_{oA}/Z_{oB} 는 피드백 시스템의 내부 루프 게인처럼 표시 될 수 있다. 따라서 나이키스트 판별법에 의해 이 루프 이득이 극 좌표계에서 $(-1, 0)$ 을 감싸지 않았을 때, 시스템은 필요충분 조건으로서 안정하다고 할 수 있다. 이와 마찬가지로 [54]에서는 식(4.2)를 만족할 경우 시스템이 안정하다는 충분조건을 제시하였다.

$$\| Z_{OA} \| \ll \| Z_{OB} \| \quad \text{or} \quad \left\| \frac{Z_{OA}}{Z_{OB}} \right\| \ll 1 \quad (4.2)$$

그림 4.2는 각 하위 시스템 A와 B의 출력 임피던스 및 입력 임피던스를 도시하고 이에 대한 나이키스트 선도를 나타낸 것으로 보드 선도에서 입출력 임피던스 선도가 서로 겹치지 않을 경우 나이키스트 선도에서는

항상 내부 루프 이득이 극 좌표계의 단위 원 안에 존재하게 되어 $(-1, 0)$ 을 감싸지 않고 안정하게 됨을 나타낸다.

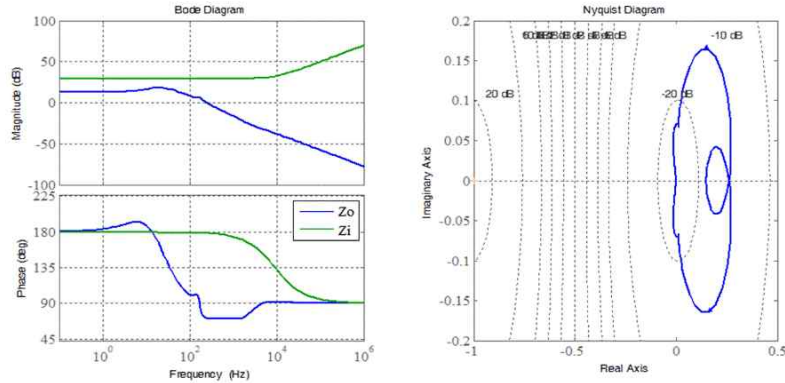


그림 4.2 입출력 임피던스 보드 선도와 나이키스트 선도의 예시

이 판별법은 시스템의 동특성을 유지하면서 가장 기본적인 안정도 조건을 제공하는 충분 조건으로서 기능하며 입출력 임피던스의 비율만으로도 쉽게 시스템 안정성을 판별할 수 있다는 장점이 있다. 게다가 이 조건은 시스템 안정성 설계 가이드를 정형화하여 제시하는 것이 가능하기 때문에 GMPM (Gain Margin and Phase Margin), OA (Opposing Argument), ESAC (Energy Source Analysis Consortium), RESC (Root Exponential Stability Criterion)과 같은 다른 여러 판별법들[55, 94-97]에 비해 더 직관적이고 여러 하위 시스템들을 묶어 안정성을 판별하기에 적합하다는 장점이 있다.

4.1.2 배전 선로 임피던스

배전 선로를 모델링 함에 있어서 두 가지로 구분 할 수 있는데 첫 번째는 배전 선로의 특성이 이상적이어서 순수 커패시터만이 배전 선로에 보인다는 가정이며 두 번째는 조금 더 현실적인 모델으로 배전 선로의 길이와 두께에 의해 기생 인덕턴스와 저항이 생기게 되고 이 성분들이 에너지원과 부하들 사이에 포함되므로 실제 모델링에도 구현을 해야 한다.

소규모 직류 배전의 경우 배전 전압에 비해 용량이 크지 않고 분산 전원들의 전력 변환 회로간에 거리가 멀지 않기 때문에 일반적으로 배전 선로 임피던스에 대한 부분을 무시하거나 혹은 전원 단과 부하 단 사이에만 임피던스를 추가하여 분석하지만 안정성 분석을 위해서는 각 전력 변환 회로 및 부하 사이에 추가하여 고려해야 할 사항이다.

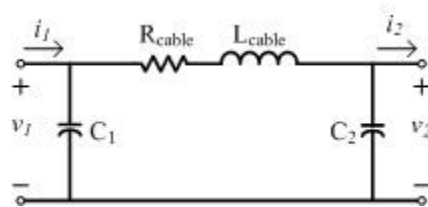


그림 4.3 두 전력 변환 회로 사이의 π -링크 모델

그림 4.3은 두 전력 변환 회로 사이에 배전 선로 임피던스가 추가된 π -링크 모델을 표현한 것이다. 두 전력 변환 회로 사이에 배전 선로에 의한 저항 성분과 인덕터 성분이 발생하며 여러 개의 전력 변환 회로가 붙은 시스템의 경우 시스템의 특성 분석이 더욱 어려워진다.

해당 배전 선로 π -링크 모델은 부하의 앞 단에 LC 필터가 달린 것과 동일한 형태를 보이며, 이에 따른 안정성 확보는 정 전력 부하를 이용한 시스템의 대 신호 모델링을 통해 연구가 진행되었다[71, 94].

해당 연구들은 대신호 안정성 판별법 및 The mixed potential criterion에 의거해 안정성의 기준을 판별하였으며, 이에 의거해 시스템이 안정적이기 위해서는 식 (4.3)의 기준을 만족시켜야 함을 확인하였다.

$$\sqrt{\frac{L_{cable}}{C_2}} < R_{cable} < \frac{v_2^2}{4V_2 I_2} \quad (4.3)$$

해당 방식은 배전 선로 임피던스로 인한 안정성 위배 뿐만 아니라 부하단의 입력 필터, 드롭 제어에서의 드롭 이득과 같은 다른 추가 저항 성분에 대해서도 동일하게 적용 가능하여, 여러 연구에서 적용되고 있다.

4.1.2.1 배전 선로 임피던스 결정

배전 선로는 그 재질, 길이 그리고 두께에 따라 임피던스가 결정된다. 기존 직류 배전 시스템에서는 배전 선로에 연결된 대용량 커패시터에 의해 직류 저항 성분에 대해서만 고려하였지만 제안하는 시스템의 경우 SIU의 빠른 제어 대역폭을 이용하여 배전 선로의 전압을 안정화 시키기 때문에 GIU와 SIU 사이에 교류 전류가 흐르면서 직류 저항과 교류 저항 그리고 임피던스에 대해 모두 계산해야 한다. 이에 대한 기준은 IEC 60287-1-1 등의 기준을 따른다[98, 99].

식 (4.4)은 도선에 대한 직류 저항에 대한 계산 값이며 식 (4.5)는 도선의 표피 효과(skin effect)와 근접 효과(proximity effect)를 모두 고려했을 경우에

대한 저항 값 공식이다. 도선 재질은 구리로 가정하였으며 리츠 와이어(Litz wire) 형식의 분절 도선(Segmental conductor)으로 가정하였다. 식 (4.6)은 도선 인덕턴스를 구하는 공식이며, 단선 와이어로 가정하여 상수를 대입하였다.

$$R_{cable_DC} = \frac{1.02 \times 10^6 \times \rho}{S} \quad (4.4)$$

Where, $\rho = 1.7241 \times 10^{-8} (\Omega m)$,

S = cross sectional area (mm^2)

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}, \quad \text{where } x_s^4 = \left(\frac{8\pi f}{R_{cable_DC}} \times 0.435 \times 10^{-7} \right)^2$$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right]$$

$$x_p^4 = \left(\frac{8\pi f}{R_{cable_DC}} \times 0.37 \times 10^{-7} \right)^2$$

Where, d_s =diameter, s =distance between axes

$$R_{cable_AC} = R_{cable_DC} (1 + y_s + y_p) \quad (4.5)$$

$$L_{cable} = 21 \left[2.303 \ln(41 / d) - 1 + \frac{\mu_o}{4} + \frac{d}{21} \right] \quad (4.6)$$

Where, d = diameter, μ_o = permeability

분석의 편의성을 위해 각 회로 및 부하 단 사이의 거리를 100 m로

가정하고, 전선 종류는 일반 가정 배선에 많이 사용하는 HIV 2.5 mm² (직경 1.6mm, 최대 전류 28A)로 고려한다. 이를 통해 구해진 배전 선로 임피던스의 값은 식 (4.7)과 같다.

$$\begin{aligned} R_{cable_DC} &\approx R_{cable_AC} = 0.7 \, \Omega \\ L_{cable} &\approx 230 \, \mu H \end{aligned} \quad (4.7)$$

위에서 구한 배전 선로 임피던스를 이용하여 간단히 GIU와 SIU 그리고 부하만으로 이루어진 시스템을 그림 4.4처럼 구성하였다.

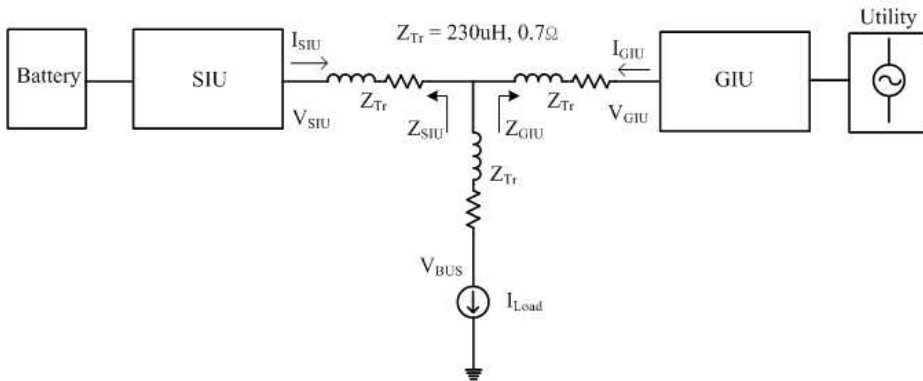


그림 4.4 배전 선로 임피던스가 포함된 직류 배전 시스템의 블록도

이에 따라 시스템의 안정성 확보를 위해서는 SIU나 GIU의 출력 임피던스에 배전 선로 임피던스를 더하여 고려해야 하며 부하 역시 정 전류 부하 혹은 정 전력 부하에 마찬가지로 임피던스를 추가한 안정도 분석이 필요하다. 또한 각 전력 변환 회로는 자신의 출력 전압을 제어하기 때문에 실제 부하 단의 전압은 배전 선로 임피던스에 의해 감소 및 왜곡되며 배전 선로 전압 범위를 산정 하여 각 하위 시스템을 설계 할 때 추가로 고려해야 한다.

4.1.3 출력 임피던스 분석

Cho's 안정도 판별법을 이용하기 위해서는 각 하위 시스템의 임피던스 정보가 필요하며 이를 위한 수학적 분석이 필요하다. 본 절에서는 각 하위 시스템의 출력 임피던스를 분석하고 이에 따른 특징을 살펴본다.

4.1.3.1 RIU

그림 4.5는 RIU의 MPPT시 하위 시스템의 소신호 제어 블록도를 나타낸 것으로 전류 제어 루프와 전압 제어 루프의 이중 루프로 구성되어 있다.

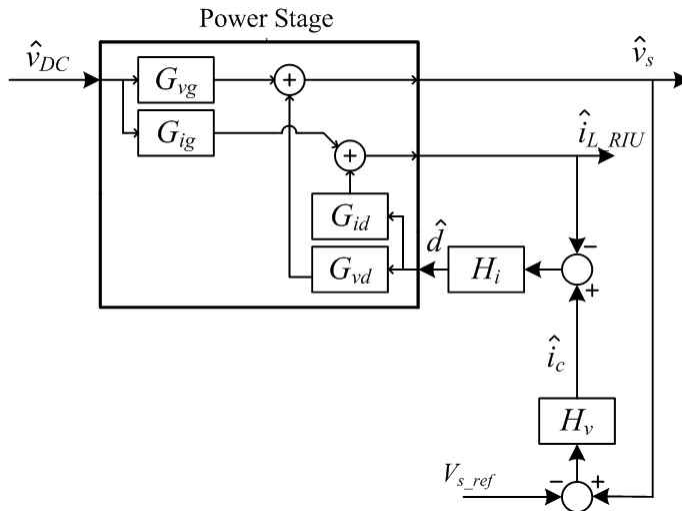


그림 4.5 MPPT 동작 모드에서 RIU의 소신호 블록도

출력 임피던스를 구하는 수식은 내부의 전류 루프를 닫아 우선 계산한 후 외부의 전압 루프를 닫아서 다시 한번 계산해야 하며 전류 루프만 닫힌 시스템의 모델은 식 (4.8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{L_RIU} \\ \hat{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ig_cl} & G_{ic} \\ G_{vg_cl} & G_{vc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{DC} \\ \hat{i}_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

이 모델에서 전달함수는 식(3.8)에 식(4.9)를 대입해 구할 수 있으며 그 결과는 식 (4.10)처럼 나타난다.

$$\hat{d} = H_i(\hat{i}_c - \hat{i}_{L_RIU}) \quad (4.9)$$

$$G_{ig_cl} = \frac{G'_{ig}}{1 + T_i}$$

$$G'_{vg_cl} = G'_{vg} - \frac{T_i}{1 + T_i} \frac{G'_{ig} G'_{vg}}{G'_{id}}$$

$$G_{ic} = \frac{T_i}{1 + T_i}$$

$$G_{vc} = \frac{T_i}{1 + T_i} \frac{G'_{vd}}{G'_{id}}$$

$$\text{Where, } T_i = H_i G'_{id} \quad (4.10)$$

이후 전압 제어 루프를 닫을 경우 전력 변환 회로는 식 (4.11)처럼 나타낼 수 있으며 이때 V_{s_ref} 의 변동이 0이라고 가정하고 식 (4.12)을 이용하면 전체 시스템의 전달함수는 식 (4.13)처럼 유도되며 최종적으로 출력 임피던스는 식 (4.14)처럼 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{L_RIU} \\ \hat{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ig_cl_v} \\ G_{vg_cl_v} \end{bmatrix} \hat{v}_{DC} \quad (4.11)$$

$$\hat{i}_c = H_v(-\hat{v}_s) \quad (4.12)$$

$$G_{ig_cl_v} = \frac{G_{ig_cl}}{1 + T_v}$$

$$G_{vg_cl_v} = \frac{G_{vg_cl}}{1 + T_v}$$

$$\text{Where, } T_v = H_v G_{vc} \quad (4.13)$$

$$Z_{o_RIU} = \frac{\hat{v}_{DC}}{-\hat{i}_o} = \frac{\hat{v}_{DC}}{-D' \hat{i}_{L_RIU}} = -\frac{1}{D' G_{ig_cl_v}} \quad (4.14)$$

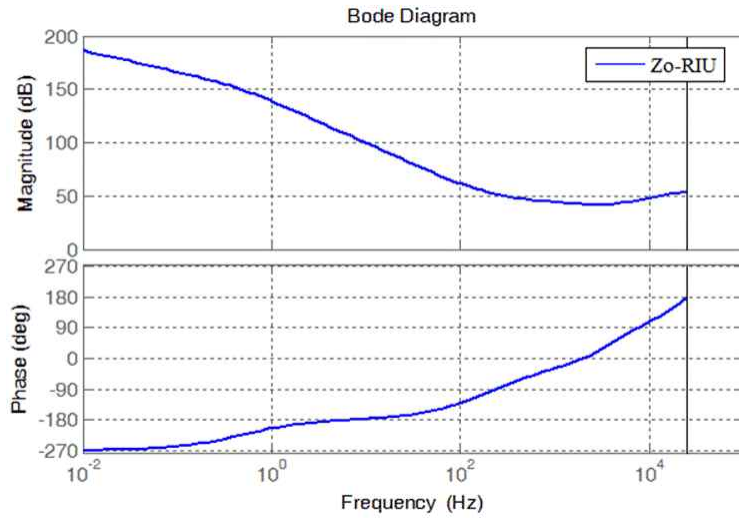


그림 4.6 RIU의 출력 임피던스 보드 선도

앞 장에서 구한 제어기 값을 이용해 RIU의 출력 임피던스를 구하면 그림 4.6과 같은 보드 선도를 얻을 수 있는데 그림에서 알 수 있듯이 RIU는 MPPT동작을 하며 버스 전압이 아닌 태양광 패널의 전압을 제어하기 때문에 일반적인 컨버터의 입력 임피던스와 같은 형상을 나타낸다. 특히 저주파 대역에서 -180° 의 위상을 가지면서 배전 선로를 불안정하게 만들 수 있는데 이는 RIU가 일종의 부하와 같은 역할을 함을 의미한다.

4.1.3.2 GIU

GIU 및 SIU의 경우에는 마스터-슬레이브 제어 방법에서의 출력 임피던스 및 드롭 제어 방법에서의 출력 임피던스 두 가지를 모두 구해야 한다. 제안한 방법은 전류 소스 형태의 전력 변환 회로를 이용해 슬레이브를 구성한 것이 아닌 일반 전압 소스 형태의 전력 변환 회로에 전류 제어만을 통해 파워 소스로 동작하게 구현하였기 때문에 마스터-슬레이브 제어 방법에서 GIU의 출력 임피던스는 전류 제어 루프만을 구성한 상태에서의 값을 사용한다.

마스터-슬레이브 동작 모드에서 소신호 블록도는 그림 3.18에서와 같으며 이를 앞의 RIU에서와 같은 방식으로 풀어낼 경우 전류 루프만 닫은 경우 식 (4.15)와 같이 얻을 수 있으며 마찬가지로 드롭 전압 제어 루프를 닫은 경우 식 (4.16)의 값을 얻을 수 있다.

$$Z_{o_GIU_MS} = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_o} = G_{vi_cl} = G_{vi} - \frac{T_i}{1+T_i} \frac{G_{ii}G_{vd}}{G_{id}}$$

$$\text{Where, } T_i = H_i G_{id} \quad (4.15)$$

$$Z_{o_GIU_droop} = \frac{G_{vi_cl}}{1+T_v} - R_d \frac{T_v}{1+T_v}$$

$$\text{Where, } T_v = H_v \left[\frac{T_i}{1+T_i} \frac{G_{vd}}{G_{id}} \right] \quad (4.16)$$

위의 식에 따라 마스터-슬레이브 동작 모드와 드롭 동작 모드에서의 출력 임피던스는 그림 4.7과 같이 나타난다.

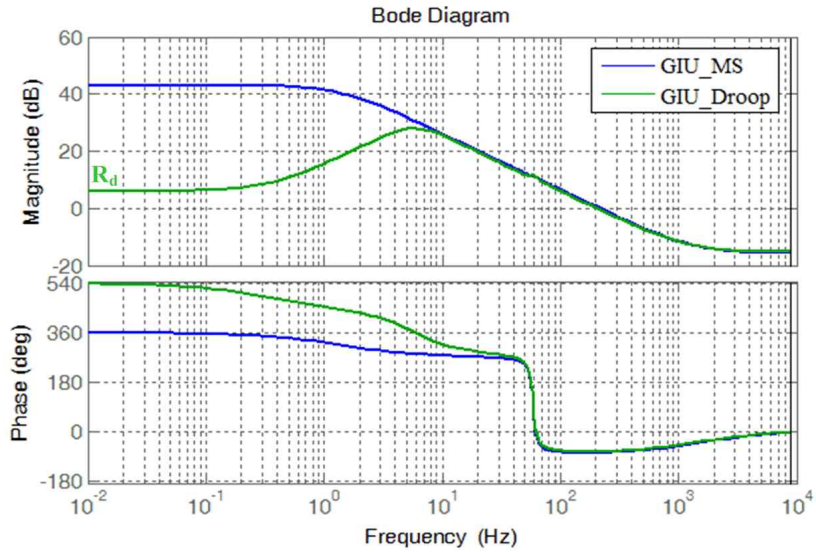


그림 4.7 GIU의 동작 모드에 따른 GIU의 임피던스 보드 선도

마스터-슬레이브 제어 모드에서는 전압 제어 루프가 포함되어 있지 않기 때문에 저주파 대역에서 출력 임피던스의 감쇄가 전혀 이루어지지 않으며, 드롭의 경우 감쇄가 진행되다 드롭 계인인 R_d 에 제한되어 일정 수준 이하로 감소하지 않는다.

4.1.3.3 SIU

SIU는 마스터-슬레이브 동작 모드와 드롭 동작 모드에서 모두 전압 제어 기능이 있으며 이에 따라 정상적인 이중 루프 제어기에 대한 출력 임피던스를 구해야 한다. 따라서 출력 임피던스는 GIU와 동일한 방식으로 유도하여 마스터-슬레이브 동작 모드에서의 식 (4.17)과 드롭 계인이 포함된 식 (4.18)를 얻을 수 있다.

$$Z_{o_SIU_MS} = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_o} = \frac{1}{1+T_v} \left[G_{vi} - \frac{T_i}{1+T_i} \frac{G_{ii} G_{vd}}{G_{id}} \right]$$

$$\text{Where, } T_i = H_i G_{id}, \quad T_v = H_v \left[\frac{T_i}{1+T_i} \frac{G_{vd}}{G_{id}} \right] \quad (4.17)$$

$$Z_{o_SIU_droop} = Z_{o_SIU_MS} - R_d \frac{T_v}{1+T_v}$$

$$\text{Where, } T_v = H_v \left[\frac{T_i}{1+T_i} \frac{G_{vd}}{G_{id}} \right] \quad (4.18)$$

그림 4.8은 SIU의 동작 모드에 따른 출력 임피던스 보드 선도를 나타낸다. SIU는 넓은 전압 제어 대역폭을 가지기 때문에 이에 출력 임피던스의 감소 영향이 커서 상대적으로 다른 전력 변환 회로들에 비해 마스터-슬레이브 제어 상태와 드롭 제어 상태에서 출력 임피던스의 차이가 큼을 알 수 있다.

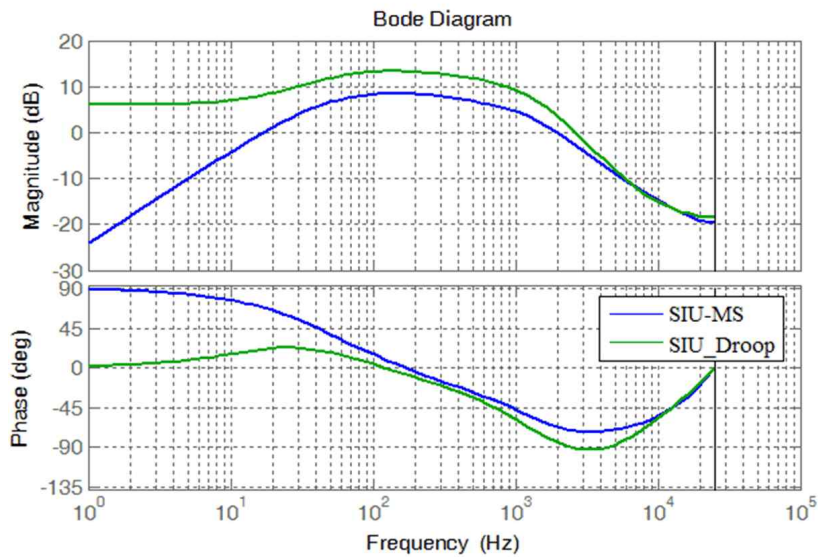


그림 4.8 SIU의 동작 모드 별 출력 임피던스 보드 선도

4.1.4 모의 실험 결과

4.1.4.1 안정성 확인 및 정상 상태 동작

앞서 설명한 Cho's 안정도 판별법을 적용하기 위해 각 전력 변환 회로들 및 부하를 등가 모델로 변환한다. 부하는 정 전력 부하 (Constant Power Load)를 고려하는데 이는 전자부하나 인버터로 구동 되는 모터 부하 등이 속하는 부하로 임피던스가 음의 특성을 가지고 있어 시스템을 불안정하게 만드는 역할을 한다[100, 101].

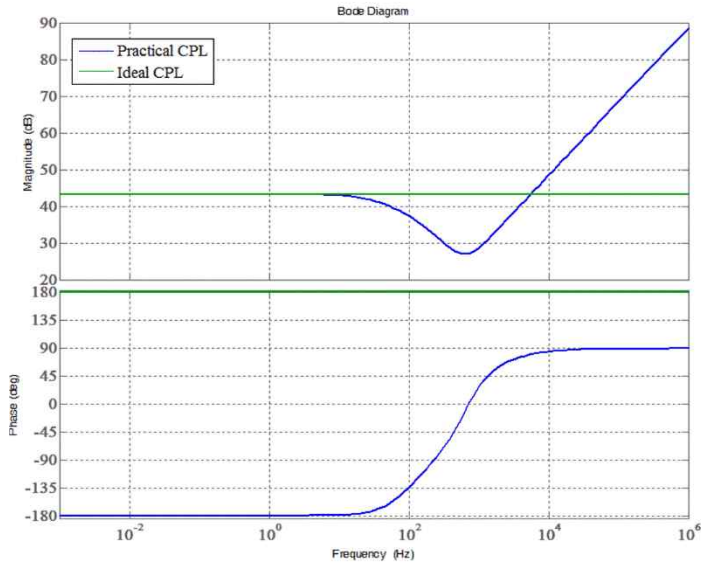


그림 4.9 정전력 부하의 임피던스 보드선도

$$R_L = \frac{-V_{in}^2}{P_{max}} \quad (4.19)$$

그림 4.9는 정 전력 부하의 임피던스 보드선도를 나타낸 것으로 이상적일 경우 식 (4.19)처럼 나타나지만 실제의 경우 모터나 컨버터가 제어 가능한 대역폭 내에서만 정 전력 부하로 동작하고 그 이후의 주파수 대역에서는 시스템의 불안정성을 야기하지 않으며 따라서 이상적인 정 전력 부하에 대한 안정성을 확인할 경우 나머지 부하에서도 안정하다고 판별 가능하다.

모의 실험은 그림 3.1의 상세 회로도와 이에 맞춰 설계한 각 제어기, 그리고 표 4.1에 설명된 조건에 따라 진행된다.

표 4.1 설계된 각 하위 시스템의 상세 정보

Unit Type	Symbol	Value	Note
GIU	f_{sw_GIU}	18 kHz	Switching frequency
	L_{GIU}	4 mH	-
	C_{GIU}	1 mF	-
	f_{BW_GIU}	1 kHz	Cut-off frequency of current controller
	$f_{BW_GIU_d}$	9 Hz	Cut-off frequency of droop voltage controller
SIU	f_{sw_SIU}	100 kHz	Switching frequency
	L_{SIU}	1 mH	-
	C_{SIU}	100 uF	-
	C_B	100 F	-
	f_{BW_SIU}	2 kHz	Cut-off frequency of voltage controller
Battery	OCV	150–240 V	Open circuit voltage range
	R_i	4.115 Ω	-
	R_{diff}	1.453 Ω	-
	C_{diff}	258.52 F	-

	$C_{battery}$	15,600 F	-
RIU	f_{sw_RIU}	50 kHz	Switching frequency
	C_{PV}	940 μ F	-
	C_{RIU}	100 μ F	-
	L_{RIU}	1 mH	-
	f_{BW_RIU}	810 Hz	Cut-off frequency of MPPT voltage controller
PV	V_{PV}	200 V	Open circuit voltage
		150 V	MPP voltage
	I_{PV}	6 A	Short circuit current
		5 A	MPP current

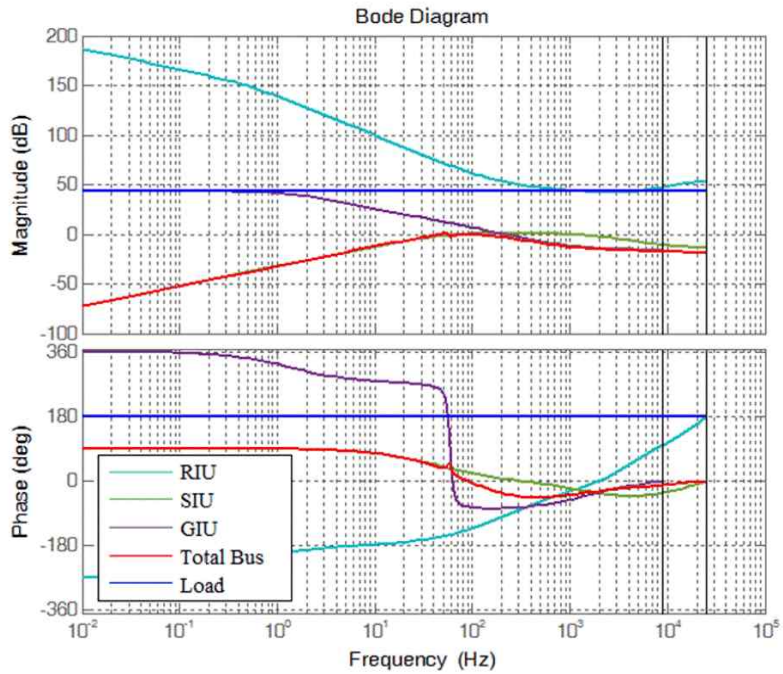


그림 4.10 각 전력 변환 회로 및 부하의 임피던스 보드 선도

그림 4.10은 각 전력 변환 회로들의 출력 임피던스와 이를 병렬로 등가화 한 임피던스 그리고 부하의 입력 임피던스를 보드 선도로 나타낸 것으로 등가 임피던스가 가장 전압 제어 대역폭이 높은 SIU와 거의 동일함을 알 수 있다. Cho's 판별법을 통해 이 보드 선도 만으로도 시스템이 안정함을 확인 할 수 있으며 그림 4.11과 같은 나이키스트 경로 그렸을 때 $(-1, 0)$ 좌표를 감싸지 않는 모습으로 역시 안정성을 확인 할 수 있다.

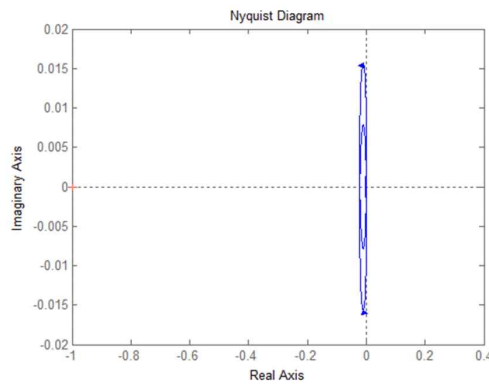


그림 4.11 등가화한 버스 임피던스의 나이키스트 경로

그림 4.12는 부하 변동에 따른 모의 실험 결과를 나타낸다. 0.4 s 시점에서 부하를 10 % \rightarrow 90 % 부하(100 W \rightarrow 900 W)로 변함에도 배전 선로의 전압은 안정적으로 유지된다. 제안한 DBS 마스터-슬레이브 제어 방식은 배전 선로 전압이 SoC에 의해 변동되므로 짧은 시간에 대한 시뮬레이션으로는 기준 전압에 변화가 발생하지 않는다. 따라서 장시간에 대한 모의 실험 결과는 이후 상위 제어기 운용 방안과 함께 나타내도록 한다.

이러한 부하 변동은 사실 작은 외란을 가정하여 선형적으로 특성을 변형하고 안정성을 판별하는 소신호 모델링 방식에서 벗어나는 조건으로, 실제 시스템이 더 복잡해 지는 경우 안정도 분석에 문제가 발생할 수 있다는 문제가 있어 대 신호 기반의 모델링을 통해 안정 영역을 판별하는 연구가 제안되었다[94, 102]. 하지만 본 논문에서 사용한 시스템처럼 구조가 복잡하지 않은 시스템의 경우에는 소신호 모델링을 통해 각 동작 평형점에서 모두 안정한 점을 확인 할 수 있도록 최악 상황 (Worst Case)에 대한 모델링을 진행하고 45° 이상의 충분한 위상 이득을 갖도록 제어기를 설계하여, 이러한 안정성 위배 상황을 벗어날 수 있다.

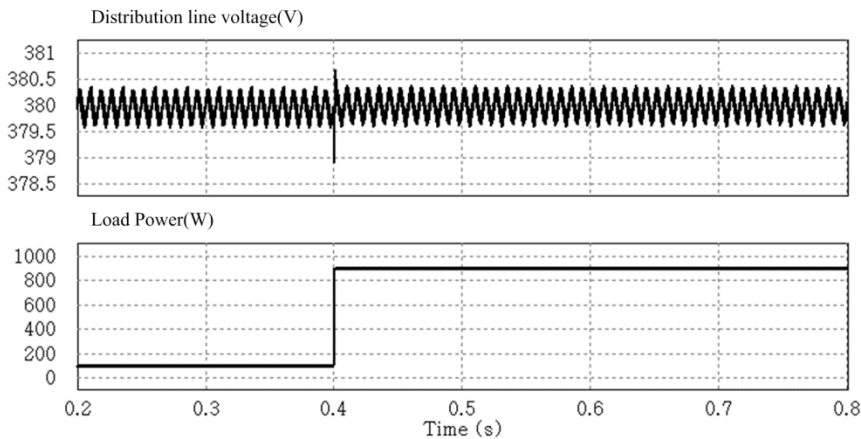


그림 4.12 부하 변동에 따른 모의 실험 결과

앞서 말했듯 배전 선로는 자체적으로 임피던스를 가지고 있으며 이에 따라 배전 선로 임피던스가 변경 될 수 있다. 이전 절에서 구한 배전 선로 임피던스를 시스템에 추가해 각 전원 단의 전력 변환회로의 출력 임피던스를 구할 경우 그림 4.13과 같은 임피던스 보드 선도를 얻을 수

있다. 배전 선로 임피던스에 의해 고주파 대역에서 부하 임피던스와 버스 임피던스 모두 상승하며 이 값이 부하와 근접하는 것을 확인 가능하지만 이 대역은 전력 변환 회로들의 스위칭 대역 이상이므로 실제 안정도에 영향을 미치지 않는다. 그림 4.14는 나이키스트 경로를 도시한 것으로 역시 시스템이 안정함을 확인 할 수 있다.

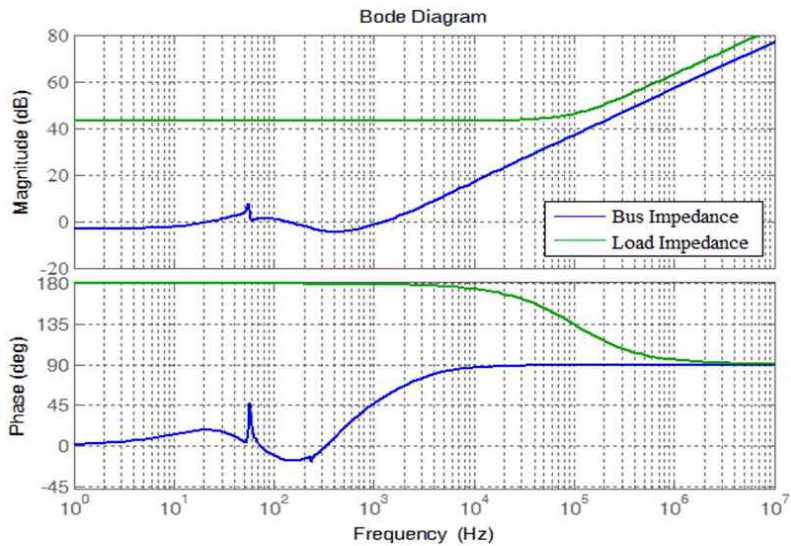


그림 4.13 배전 선로 임피던스를 포함한 임피던스 보드 선도

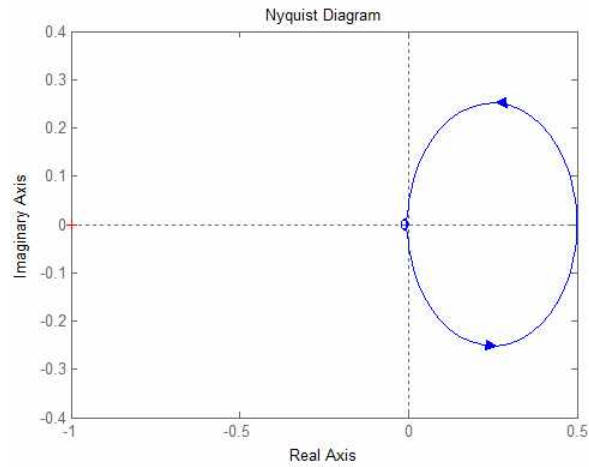


그림 4.14 배전 선로 임피던스를 포함한 나이키스트 경로

그림 4.15는 배전 선로 임피던스를 포함한 모의 실험 파형이다. 이전 모의 실험과 동일하게 0.4 s에서 부하를 100 W \rightarrow 900 W로 변화시켰으며 이에 따른 배전 선로 전압을 나타낸다. 판별법을 통해 분석한 대로 시스템은 안정적이며 이전과 다른 부분은 직접적으로 제어하는 SIU의 출력 전압은 380 V의 출력을 유지하지만 실제 부하단의 전압은 배전 선로 저항값에 의해 전압 강하가 일어나 실제 부하단에서 바라보는 전압 값은 부하 및 각 전력 변환회로의 전력 양에 따른 추가적 변동이 발생한다.

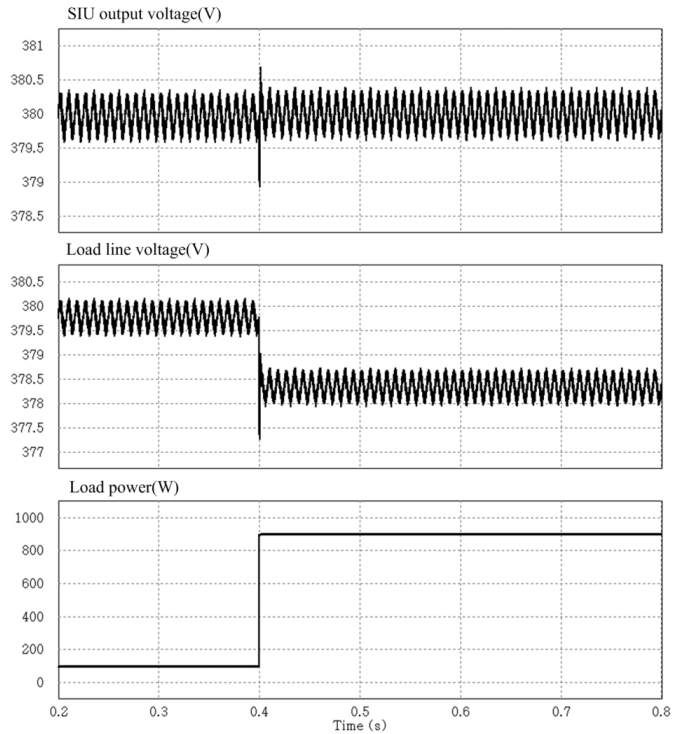


그림 4.15 배전 선로 임피던스를 포함한 부하 변동 시 모의 실험 결과

4.1.4.2 사고 상황(드롭 제어) 시 안정성 확인 및 동작

제안한 시스템은 사고 시 드롭 제어에 대한 시스템 안정도 분석 역시 함께 이루어져야 하며 그림 4.16과 그림 4.17은 R_d 를 0.5로 놓고 배전 선로 임피던스를 포함한 드롭 제어시의 임피던스 보드 선도와 나이키스트 경로를 나타낸다. 역시 시스템이 안정적으로 설계 되었음을 알 수 있으며 드롭 제어 시에는 드롭 이득의 영향으로 인해 GIU와 SIU가 확연히 차이나는 전압 제어 대역폭을 가졌음에도 불구하고 비슷한 크기의 출력 임피던스를 가지는 것을 확인 가능하다.

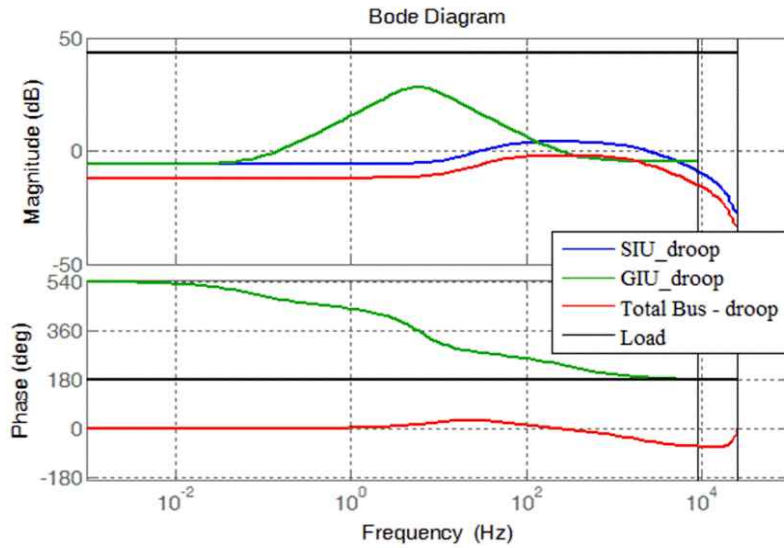


그림 4.16 드롭 제어시 임피던스 보드 선도

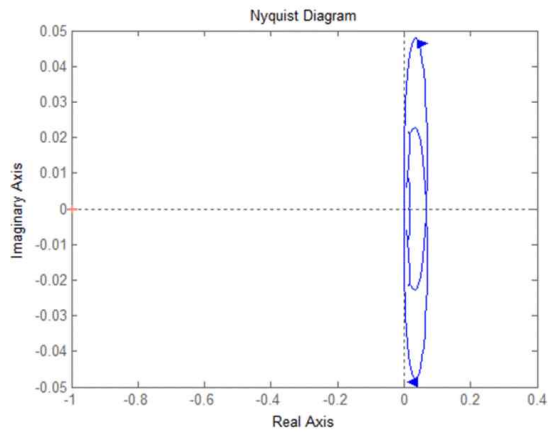


그림 4.17 드롭 제어시 나이키스트 경로

그림 4.18은 드롭 제어 시 부하 변동에 대한 안정성을 확인하기 위한 모의 실험 파형이다. 이전 모의 실험들과 마찬가지로 100 W \rightarrow 900 W로의

순간 부하 변동이며 역시 안정적으로 시스템이 동작함을 확인 할 수 있다. 드롭 제어의 경우 드롭 이득의 임피던스 제한으로 인해 SIU가 GIU의 120 Hz 전압 변동을 충분히 깎아 주지 못하면서 출력 전압에 120 Hz 리플이 섞여 보인다. 또한 출력 전류의 변동으로 인해 제어 전압 값이 변하면서 느린 과도상태 응답 특성이 나타난다.

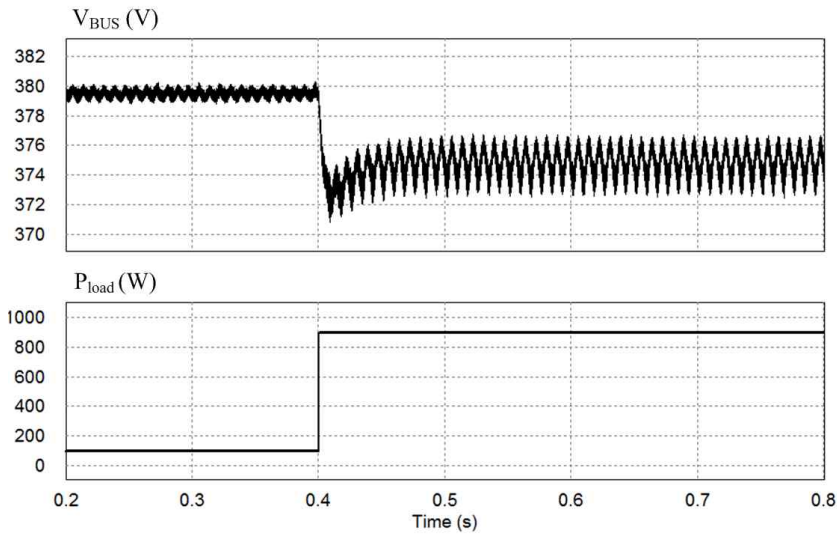


그림 4.18 드롭 제어 시 부하 변동에 대한 모의 실험 파형

그림 4.19는 안정성이 확보된 드롭 제어를 설계한 후 마스터-슬레이브 동작 상황에서 마스터 회로에 문제가 발생하여 차단된 후 드롭으로 제어권이 넘어 가는 상황을 모의 실험을 통해 확인한 결과이다. 부하는 900 W 정전력 부하 상황으로 가정했으며, 마스터-슬레이브 동작 도중 0.4 s 지점에서 마스터에 문제가 생겨 차단 된 후, 배전 선로 전압을 제어하는 전압원이 사라져 배전 선로 전압이 미리 설정된 Non-Detection Zone (NDZ)

기준 전압에서 벗어난다. 이는 슬레이브에서 배전 선로 전압을 센싱하여 전류 제어원으로 동작하던 슬레이브에 그림 3.22에서처럼 비상용으로 추가했던 드롭 제어가 포함된 전압 제어기를 동작시켜 배전 선로 전압을 유지하도록 한다. 이에 따라 마스터인 SIU의 전류치가 0이 되고, GIU가 부하를 전부 감당하면서 배전 선로 전압 리플이 위에서 비교한 바와 같이 크게 나타난다. 전압 제어기의 제어 대역폭이 낮은 GIU의 특성상 마스터가 차단 된 후 전압을 회복하기 위해 충분한 시간이 필요하며, 본 모의 실험에서는 약 0.3s의 시간을 필요로 한다.

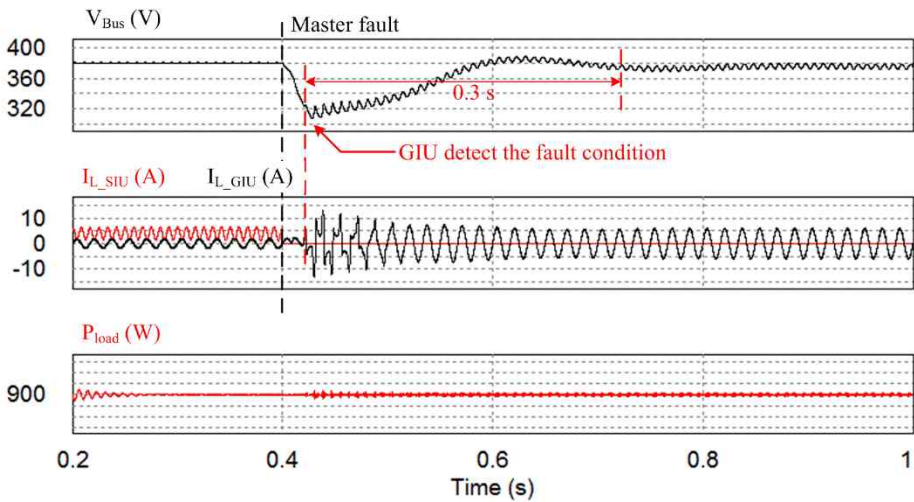


그림 4.19 사고 상황시 드롭 제어 전환 모의 실험 파형

추가로 1장에서 언급했던 드롭 이득에 따른 시스템 안정성 문제를 확인해 보기 위해 드롭 이득 R_d 를 2로 키운 드롭 제어 기반의 시스템과 DBS 마스터-슬레이브 기반 시스템의 임피던스를 비교하고, 이를 배전 선로 임피던스가 포함된 정전력 부하에 대해 나이키스트 안정성 판별을

진행한다. 동일 회로, 동일 제어기를 사용했을 경우 마스터-슬레이브 제어의 경우 그림 4.20의 (b)와 같이 그대로 안정했으며, 드롭 제어의 경우 R_d 가 0.5일 때에는 그림 4.20 (c)의 파란색 나이키스트 그래프에서처럼 안정한 결과를 얻을 수 있었지만 R_d 를 2로 키웠을 경우 초록색 그래프에서 확인 할 수 있듯이 나이키스트 판별 결과 상 (-1,0)을 감싸면서 불안정한 상황이 됨을 확인 할 수 있다.

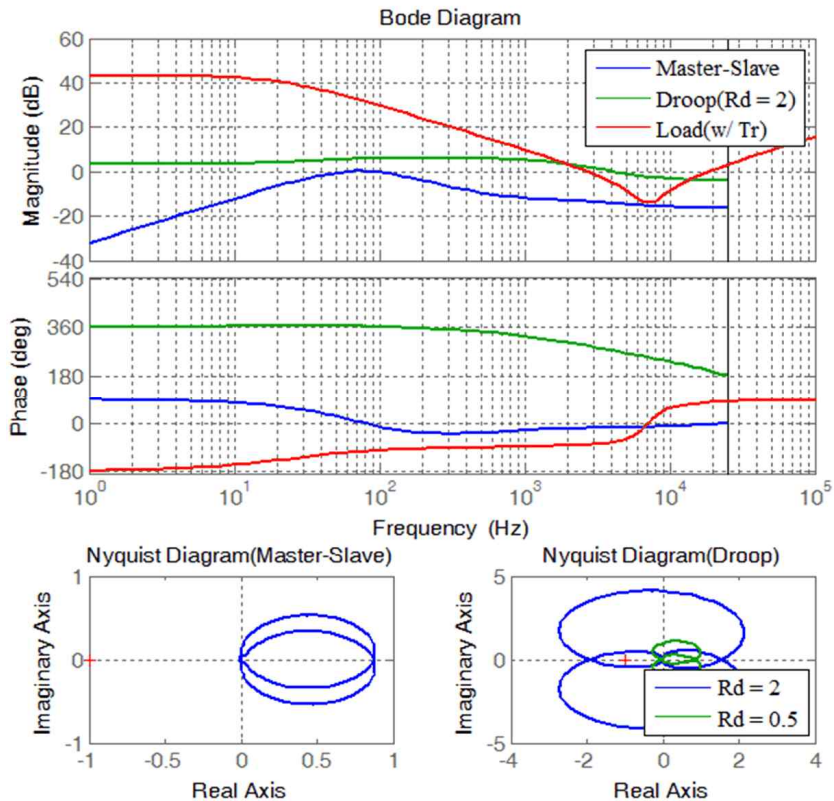


그림 4.20 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어의 안정도 비교

그림 4.21은 R_d 가 2일 경우 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어로 동작하는 동일한 시스템의 비교 모의 실험 결과이다. 앞서 나이퀴스트 판별법의 결과에서 확인했듯이, R_d 가 2일 경우 시스템이 불안정 영역에 속하며, 이에 따라 부하 변동 시 전류 제어기의 동작에서 불안정한 상태가 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

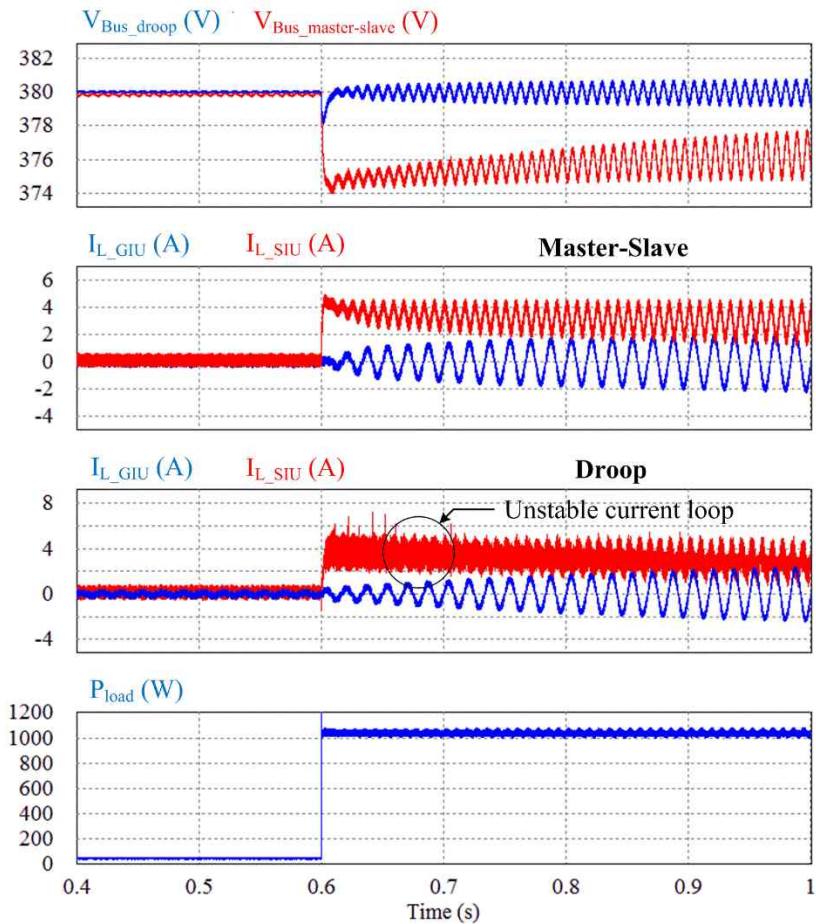


그림 4.21 R_d 가 2일 때 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어 안정성 비교

4.1.4.3 마스터-슬레이브 제어와 드롭 제어 비교

앞 절에서 마스터-슬레이브 제어 방법과 드롭 제어 방법간의 소신호 모델링 및 제어기 설계 그리고 출력 임피던스 산출 방법을 알아보았으며 본 절에서는 이 두 제어 방법간의 출력 임피던스 차이 및 회로 설계 시 나타나는 특성 차이를 비교하도록 한다.

우선 마스터-슬레이브 제어 방식은 배전 선로 임피던스가 전압을 제어하는 SIU에 의해 결정되므로 SIU에 대한 분석만을 진행하며 드롭의 경우 드롭 이득이 없을 시 동특성은 SIU에 의해 결정 되겠지만 2장에서 언급한 대로 드롭 이득에 의해 임피던스가 제한되기 때문에 SIU와 GIU를 모두 포함하여 분석해야 한다. RIU의 경우 배전 선로 전압 제어와는 상관 없기 때문에 본 절에서는 무시하도록 한다.

마스터-슬레이브와 드롭 제어를 비교하기에 앞서 우선 드롭 제어 내에서 GIU와 SIU를 먼저 비교하도록 한다. 이 비교는 전압 제어 대역폭이 확연히 차이가 나는 두 전력 변환 회로가 드롭 제어로 묶여 출력 임피던스가 제한되어 있을 경우 시스템의 동특성이 어떤 전력 변환 회로를 기준으로 결정되는지를 확인하기 위함이다. GIU와 SIU를 함께 묶었을 경우 출력 전류에는 GIU의 입력 교류 전압으로 인한 전류 리플이 섞이게 되며, 이 상태에서 부하 변동에 대한 각 전력 변환 회로의 특성을 분류하기가 쉽지 않기 때문에 본 절에서는 GIU대신 전압 제어 대역폭을 수십 Hz로 제한한 직류-직류 전력 변환회로를 이용하여 차이를 확인한다.

그림 4.22는 동일한 구성에 전압 제어 대역폭만이 각각 1 kHz와 9 Hz로

서로 다른 두 전력 변환 회로의 기본 출력 임피던스를 나타낸다. 그림 2.9에서 간략화 하여 나타낸 바와 같이, 드롭 제어로 묶이지 않을 경우 전압 제어기 대역폭이 높은 전력 변환 회로가 전류 루프만을 닫은 회로의 저주파 구간 출력 임피던스를 더 많이 감쇄시켜 전압 제어기의 대역폭이 낮은 회로의 출력 임피던스가 훨씬 큰 형태를 보이는데, 이는 부하 변동 시 과도 상태에 대한 대응을 전압 제어 대역폭이 높은 회로가 대부분 감당하게 됨을 뜻하며, 실제 드롭을 사용하지 않은 두 회로를 병렬로 사용할 경우 배전 선로의 동 특성 등은 제어 대역폭이 높은 회로에 의해 결정된다.

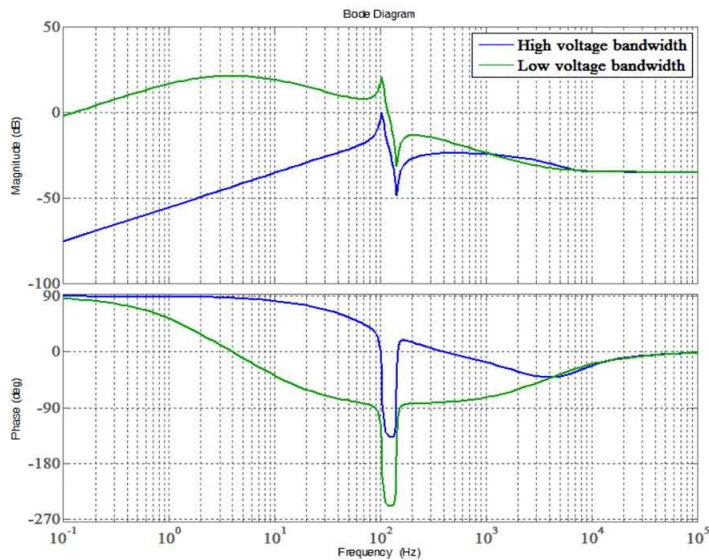


그림 4.22 전압 제어 대역폭이 다른 두 컨버터의 출력 임피던스 비교

그림 4.23은 드롭 제어를 포함시켰을 경우 출력 임피던스를 비교한 보드 선도이다. 드롭 이득에 의해 전압 제어 대역폭이 높았던 전력 변환 회로의 출력 임피던스가 제한되는데, 이는 모든 종류의 부하 변동 및 외란이 발생했을 경우 과도 특성이 나빠짐을 의미한다.

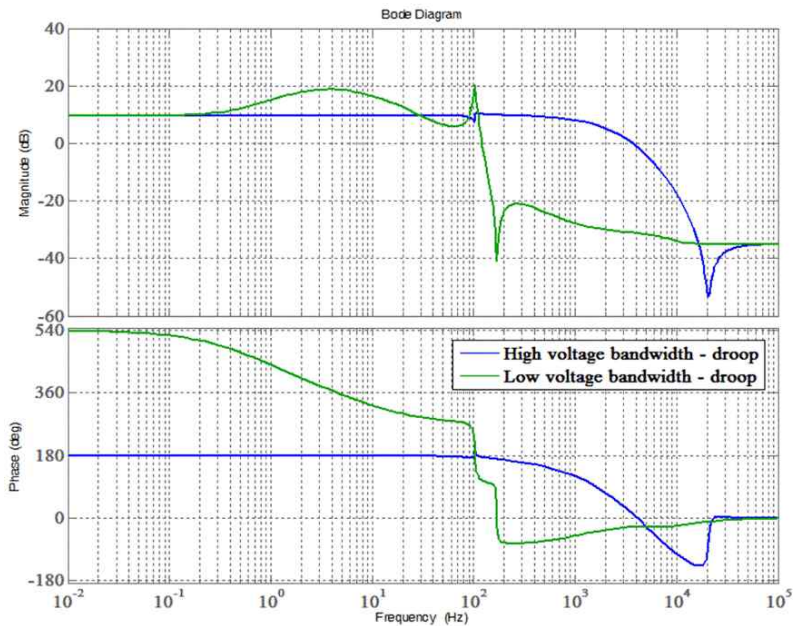


그림 4.23 드롭 제어시 출력 임피던스 비교

그림 4.24는 시간 0.5 s에 100 W → 900 W로의 순간 부하 변동 시 드롭 제어로 동작하는 시스템의 과도 특성을 나타낸다. 전압 제어기의 대역폭이 빠른 SIU가 먼저 배전 선로의 출력 전압을 안정화 시키며 이로 인해 배전 선로 전압은 그림 4.25처럼 출력 전류 변화와 SIU의 드롭 이득의 곱만큼 ($\Delta V_{\max} = R_{d_SIU} \times \Delta I_{Load}$) 출력 전압이 강하하였다가 GIU가

드롭 곡선에 따라 정해진 분배 전류를 찾아가면서 정상상태에 돌입한다. 이러한 특징은 드롭 제어 시 전압 제어 대역폭이 넓은 전력 변환 회로가 부하 변동의 대부분을 감당하기 때문에 발생하며, 따라서 마스터-슬레이브 제어 시 발생 하는 것과 동일한 전압 리플에, 드롭 이득으로 인한 추가 전압 강하가 발생한다.

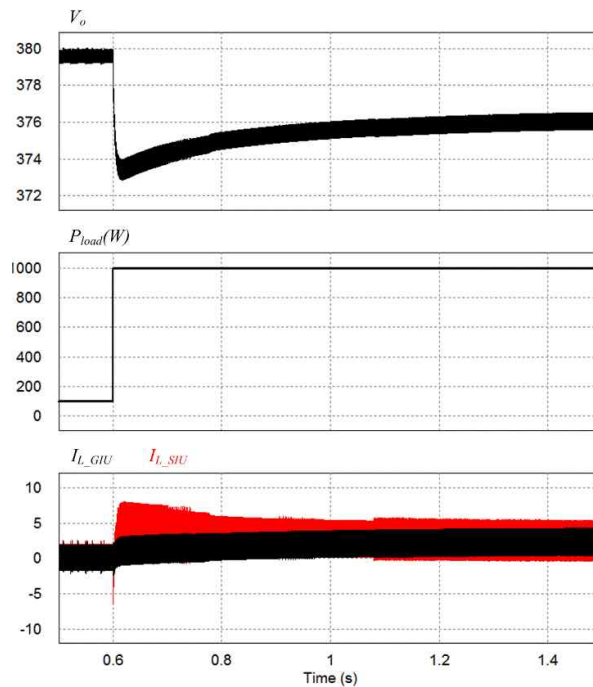


그림 4.24 드롭 제어 시 순간 변동 부하에 대한 모의 실험 결과

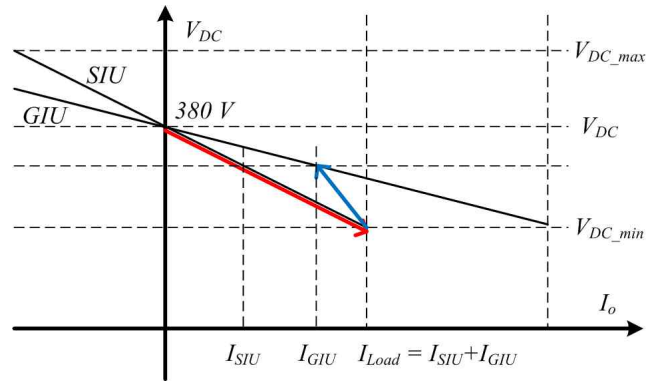


그림 4.25 드롭 제어 시 과도 상태 출력 전압 특성

그림 4.26은 순간 부하 변동이 아닌 지속적인 부하 변동에 대한 모의 실험 결과이다. 최소 부하인 0 W 에서 최대 부하인 1 kW 까지 부하가 12 Hz 의 주기로 지속적으로 변동하며, 저주파 출력 임피던스가 드롭 이득에 의해 제한되는 드롭 제어의 경우 배전 선로에 큰 전압 리플이 발생하는 것을 확인 가능하다.

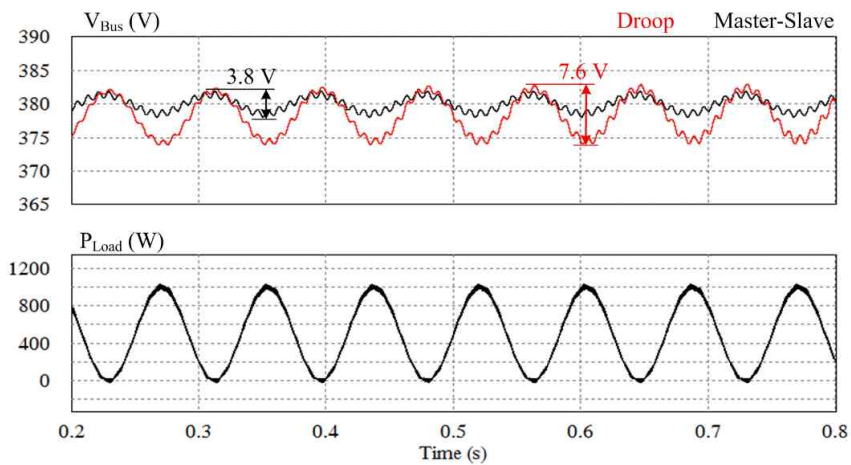


그림 4.26 드롭 제어와 마스터-슬레이브 제어시 지속적인 변동 부하에 대한 모의 실험 결과

해당 문제는 소규모 직류 배전에서 단상 교류-직류 정류기를 사용해 시스템을 구성 할 경우 입력 전류 역률 보상으로 인해 발생하는 전류 리플에 대해 SIU가 반응하지 않음을 나타내며 따라서 단상 시스템에서 GIU는 식 (4.20)에 따라 대용량 출력 커패시터를 사용해야 한다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다.

$$V_{Bus_ripple} = \frac{P_{GIU}}{4\pi f_{GIU.in} C_{Bus} V_{Bus}} \quad (4.20)$$

위에서 살펴 보았듯이 드롭 제어는 드롭 이득을 통한 제어점의 변화 및 임피던스 제한으로 인해 배전 선로 전압에 큰 전압 리플 및 부하 변동 등에 의한 느린 응답 특성을 가지며 따라서 부하의 입력 전압 범위를 좁히기 위해서 대용량 배전 선로 커패시터를 사용하고 드롭 이득을 줄여 제어점 변동의 폭을 줄여야 한다. 하지만 배전 선로 커패시터의 증가는 사용자와 부하의 입장에서 선로의 단락 사고 발생 시 큰 사고 전류를 발생시켜 안정도의 문제를 일으키며 드롭 이득을 줄이는 것 역시 시스템 안정도를 줄여 시스템의 신뢰성을 저해하는 것으로 알려져 설계상의 문제가 된다[103].

4.2 DBS 마스터-슬레이브 동작 확인

4.2.1 하위 제어기의 구성 및 외부 지령치

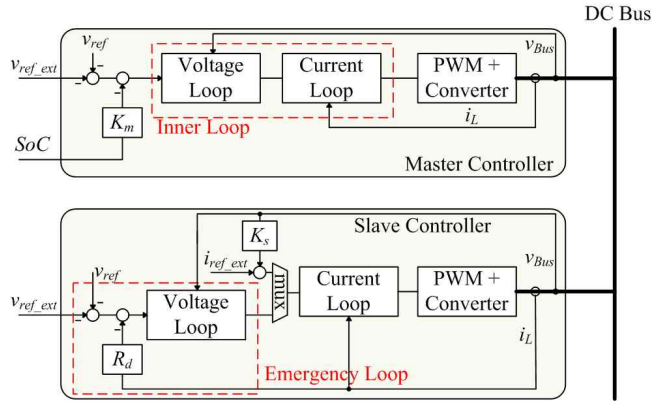


그림 4.27 상위 제어기의 외부 지령치를 포함한 DBS 마스터-슬레이브 제어
의 하위 제어기 개략도

제안한 방식은 마스터-슬레이브 제어에 배전 선로 전압 DBS가 포함되어 있어 기준 배전선로 전압이 SoC에 따라 변동한다. 따라서 마스터-슬레이브 기반의 제어 방식임에도 드롭 제어처럼 배전 선로 전압의 변동폭이 크며, 이를 회복하기 위한 기술이 필요하다.

그림 4.27은 상위 제어기에서 전달 받는 외부 지령치를 포함한 하위 제어기의 모델이다. 내부 DBS 커브를 위한 지령치에 외부 지령치를 더할 수 있는 구조로 되어 있으며, 상위 제어기에 문제가 발생하거나 외부 지령이 필요 없을 경우에는 해당 외부 지령치(e.g. v_{ref_ext} , i_{ref_ext})를 0으로 고정한다.

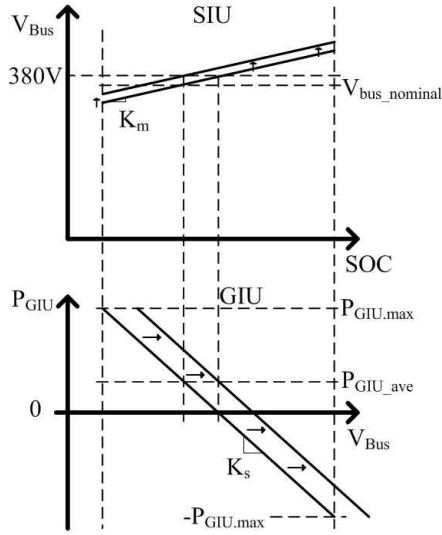


그림 4.28 전압 회복 개념도

그림 4.28은 이를 이용한 전압 회복 방식의 개념도이다. 변경된 배전선로 전압을 회복하면서, 전류 분배치를 유지하는 것을 목표로 하며 이를 달성하기 위한 외부 지령치 값은 식 (4.21), (4.22)와 같다.

$$V_{ref_ext} = K_m \times \Delta SoC \quad (4.21)$$

$$I_{ref_ext} = \frac{K_s \times V_{ref_ext}}{V_{Bus}} \quad (4.22)$$

해당 외부 지령치 값을 각 하위 시스템을 설계하면서 미리 정해 놓은 K_s 와 K_m 을 이용하여 SoC의 변동 값에 따라 간단하게 구할 수 있으며, SoC의 변동 속도 자체가 매우 느리기 때문에 낮은 대역폭의 통신을 통해 구현 가능하다.

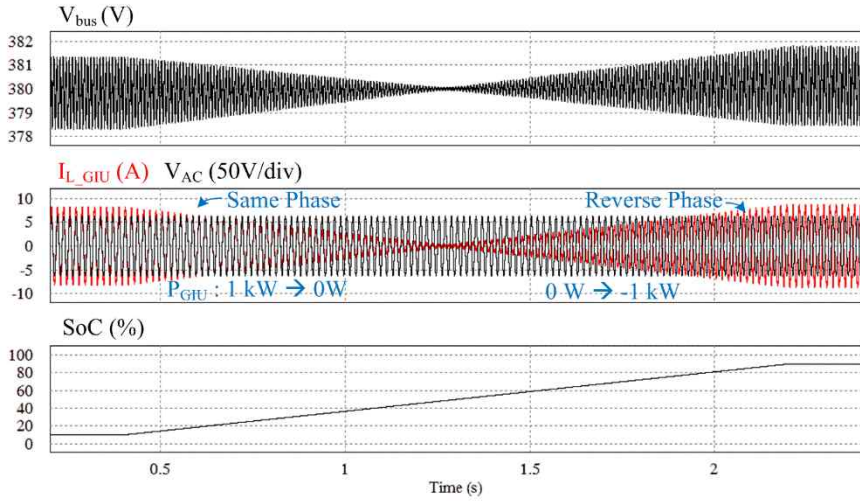


그림 4.29 전압 회복을 적용한 모의 실험 결과

그림 4.29는 위에서 나타낸 외부 지령치를 추가하였을 경우의 모의 실험 결과로 배전 선로 전압이 380 V로 유지되면서 SoC의 변동에 따라 GIU의 출력 즉 P_{GIU} 가 1 kW에서 0 W로 그리고 -1 kW까지 변동되는 모습을 나타낸다.

4.2.2 슬레이브 커브 디자인 및 기준점 변동

앞의 DBS 커브로 인한 배전 선로 전압 왜곡을 회복하는 방법과 마찬가지로 하위 제어기의 외부 지령치 값을 이용해 슬레이브의 생산 에너지 기준점 변동 및 EMS 알고리즘 적용을 위한 가중치 입력 등이 가능하다. 특히 슬레이브의 기준점 변동은 저장 장치에 저장 되어 있는 에너지의 기준점을 바꿀 수 있으며, 이를 통해 저장 장치의 활용도를 변동

시킬 수 있어 중요한 값 중 하나이다. 예를 들어, 기준점을 50 %로 놓을 경우 저장 장치의 SoC가 50 % 보다 작을 경우 충전 모드, 클 경우에는 방전 모드로 동작하지만, 기준점을 70 %로 놓을 경우 이에 맞춰 충, 방전 상황이 변경되므로, 적극적인 EMS 동작을 위해서는 해당 기준점에 대한 지속적인 변경이 필요하다.

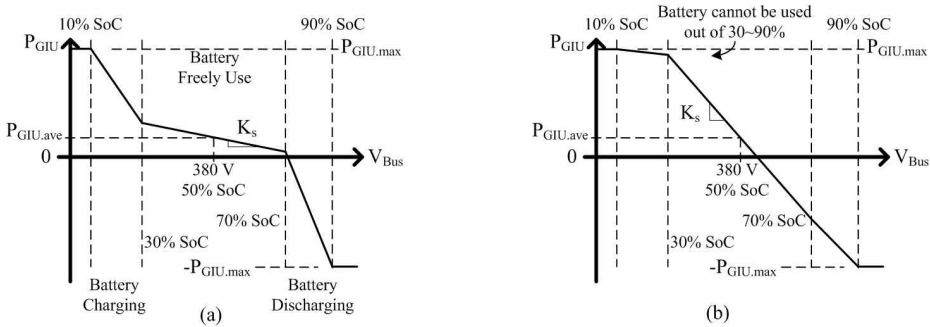


그림 4.30 슬레이브 DBS 커브의 예

그림 4.30은 비선형적인 슬레이브 커브의 두 가지 예시를 나타낸다. 커브 (a)는 저장 장치의 적정 사용 범위 내에서 작은 K_s 값을 택해 저장 장치를 좀 더 넓은 범위에서 사용하고, 저장 에너지가 일정 범위 이상을 벗어 날 경우 슬레이브의 전력 분담량을 늘려서 저장 장치의 과충전이나 과방전 상태를 억제한다. 이때 기준점인 $P_{GIU,ave}$ 값이 중요해 지는데, 이는 배전 선로 전압이 380 V일 때 슬레이브의 발전 에너지량을 의미하며, 또한 하루 평균 부하 사용량과 신 재생 에너지원에서 생산된 평균 에너지량의 차이로서 저장 장치를 충 방전하기 위한 기준점이 되기도 한다.

해당 기준점의 변동은 식 (4.23)과 같이 기존 식 (4.22)의 외부 지령치에 $P_{slave,ave}$ 값을 추가하여 보정 가능한데, $P_{slave,ave}$ 는 하루 사용하는 부하량의

평균 값인 $P_{Load,ave}$ 와 신 재생 에너지 발전량인 P_{RIU} 의 평균 값을 예측하여 이 차이를 통해 선정 가능하며, 기존의 부하 및 발전량 데이터를 이용해 계절별 기준치를 미리 선정하여 사용도 가능하다.

$$I_{ref_ext}^* = \frac{K_s \times V_{ref_ext}}{V_{Bus}} + \frac{P_{slave,ave}}{V_{Bus}} \quad (4.23)$$

그림 4.30 (b)는 저장 장치를 좀 더 소극적으로 사용하는 경우를 나타낸 것으로 큰 K_s 값을 이용해 저장 장치의 에너지 저장량이 일정 SoC 범위를 넘지 못하도록 제한한다. 따라서 저장 장치는 순간적인 부하 변동 등에 대응하는 일종의 Active Filter와 같은 역할을 주로 하게 된다.

4.2.3 DBS 마스터-슬레이브 커브에 기반한 모의 실험 결과

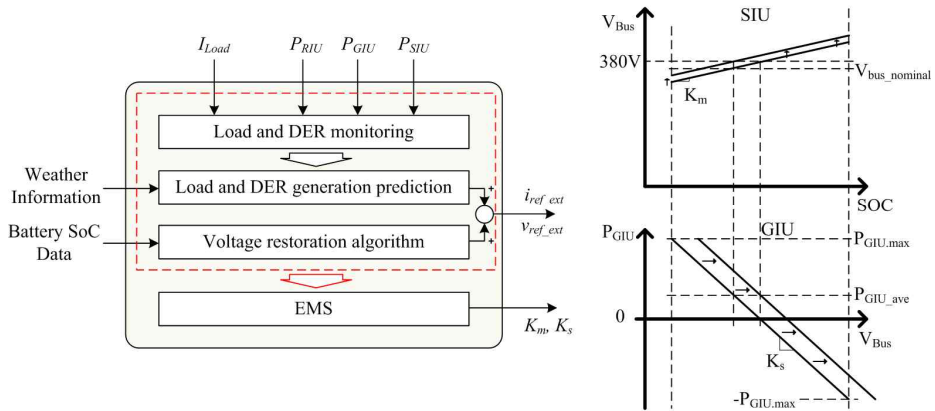


그림 4.31 DBS 마스터-슬레이브 상위 제어기 지령치 변경 개념도

본 절에서는 DBS 마스터-슬레이브 제어 방법을 이용한 전체 시스템의 기본 동작과, 통신을 통해 외부 지령치를 사용한 경우 차이에 대해 확인한다. 이를 위한 모의 실험 모델은 앞서 설계한 그림 3.1과 표 4.1의 내용을 기반으로 하여 모의 실험을 진행하며, 상위 제어기 및 외부 지령치의 지령 방식은 그림 4.31의 모델을 따른다. EMS 동작 알고리즘은 본 논문에서 다룰 범위가 아니기 때문에 [104-106]와 같은 EMS 관련 연구들을 참조하여 기본 동작들을 확인해 볼 수 있다.

우선 DBS 마스터-슬레이브 커브를 적용한 시스템의 정상 상태 동작을 확인하기 위해 그림 4.32과 같은 순간 부하 변동에 대한 모의 실험 결과를 확인하였다. SoC의 변동이 너무 느리기 때문에 모의 실험을 통한 정상 상태 변동을 확인하기 힘들어 저장 장치의 용량을 1/3600배로 줄였으며, 0.5 s에 100 W 부하에서 900 W 부하로 변동시켰을 경우 시스템의 동작을 확인하였다. 신 재생 발전량이 0이며 부하가 존재하므로 시스템은 배터리를 방전하는 상태가 된다.

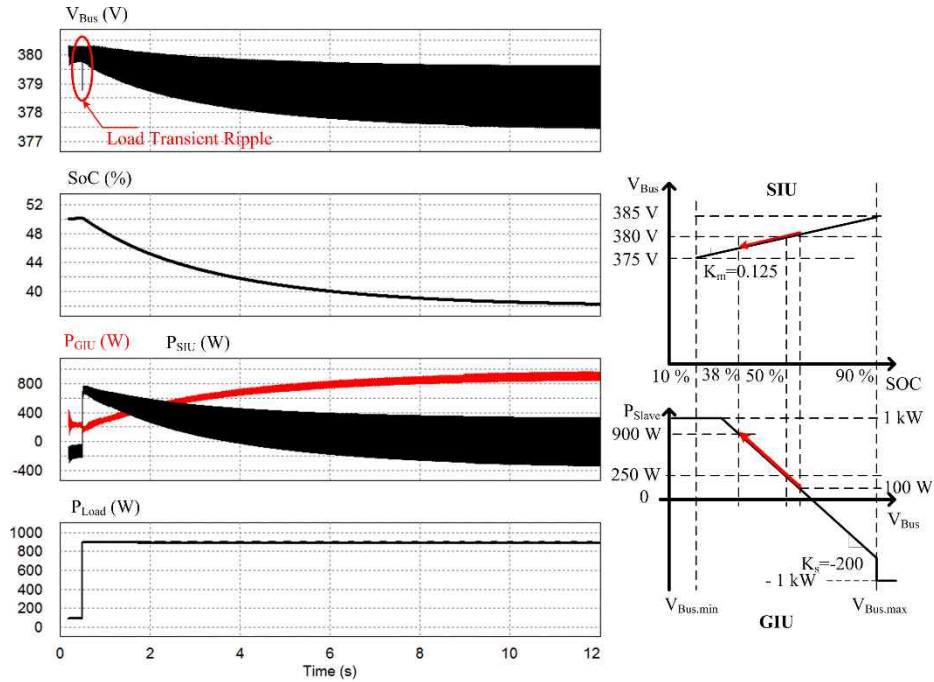


그림 4.32 순간 부하 변동 후 정상상태 모의 실험 결과

순간 부하 변동 시 배전 선로의 전압 리플은 SIU에 의해 빠르게 보상되기 때문에 앞선 단시간 모의 실험 결과와 마찬가지로 2 V의 작은 전압 리플이 발생하였으며, 이후 DBS 마스터-슬레이브 커브에 붉은색 화살표에서 나타난 것처럼 배전 선로의 전압과 GIU의 전달 에너지가 천천히 변한다. 이때 비 제어형 슬레이브인 RIU의 발전량은 0으로 가정했으며 외부 지령치인 P_{ext} 는 250 W로 고정시켰다. 해당 외부 지령치는 앞서 언급한 바와 같이 DBS 마스터-슬레이브 커브의 상하 및 좌우를 조정하여 기준 SoC 위치 및 배전 선로 전압 위치를 조절 가능하다. 해당 모의 실험에서는 슬레이브의 P_{ext} 에만 offset을 주었기 때문에 DBS 커브

곡선에서 확인 할 수 있듯이, 슬레이브 커브의 offset이 250 W만큼 상향 조정되어 구성되었다.

모의 실험 결과에서 볼 수 있듯이 제안한 제어 방식을 이용한 시스템은 부하가 변동되지 않는 정상 상태 동작 시 최종적으로 슬레이브가 전체 부하량을 감당하는 방향으로 동작하며, 마스터는 부하의 변동분을 감당하고 배전 선로 전압을 유지하는 방향으로 동작한다. 이는 기존 제어 방식들이 각 하위 시스템에서 일정 비율로 부하를 부담하고 이를 유지하는 방향으로 제어하여 정상 상태가 오래 유지될 경우 에너지 용량이 한정된 저장 장치가 과 충전 혹은 과 방전 상태로 이르는 것과는 상반된 결과로, 슬레이브 DBS 커브에 따른 저장 장치의 에너지 용량 유지에 유리함을 확인 할 수 있다.

그림 4.33는 마찬가지로 RIU의 발전량을 0으로 놓은 상태에서 주기적인 부하 변동에 대한 GIU와 SIU의 대응을 모의 실험으로 확인한 결과이다. 부하는 $100\text{ W} \rightarrow 900\text{ W} \rightarrow 100\text{ W}$ 로 주기적으로 변동되며, 1/3600배로 줄인 배터리 상태에서 DBS 마스터-슬레이브 제어 방식을 통해 동작시켰다. P_{GIU} 는 SoC의 변동에 따라 매우 느리게 증가하는 형태를 보이며, P_{SIU} 는 GIU에서 발생하는 120 Hz 전류 리플을 보상하면서 부하의 변동에 따라 배전 선로 전압을 제어한다. 즉, GIU는 장기간 시스템의 평균 에너지 소모는 분담하지만 순간 변동에 대해서는 전혀 관여하지 않으며, 따라서 부하가 심하게 변동하는 부하 모델에서는 SIU의 스트레스가 커진다.

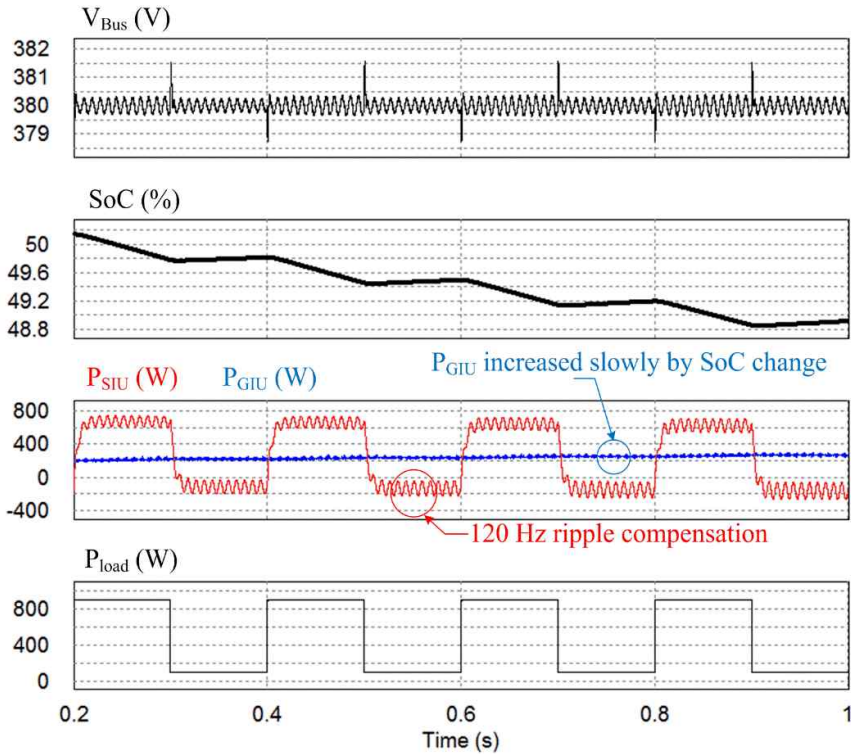


그림 4.33 주기적인 부하 변동에 대한 모의 실험 결과 (1)

그림 4.34은 저장 장치의 용량을 1/24400으로 줄인 상태로 동일한 주기적 부하 변동에 대한 모의 실험 결과를 나타낸 것이다. 저장 장치의 용량을 더 줄였기 때문에 SIU의 충 방전에 따라 SoC 상태가 빠르게 변동하며, 이에 맞춰 SIU와 GIU의 에너지 분배가 정상상태까지 빠르게 변동하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 4.32의 모의 실험을 통해 확인했던 대로 일정 시간이 지나면 SIU의 에너지 분배량은 0이 되고 이에 따라 Shunt Regulator처럼 배전 선로 전압 관리만을 담당하며, 부하 에너지를 GIU가 관리하는 것을 확인하였다.

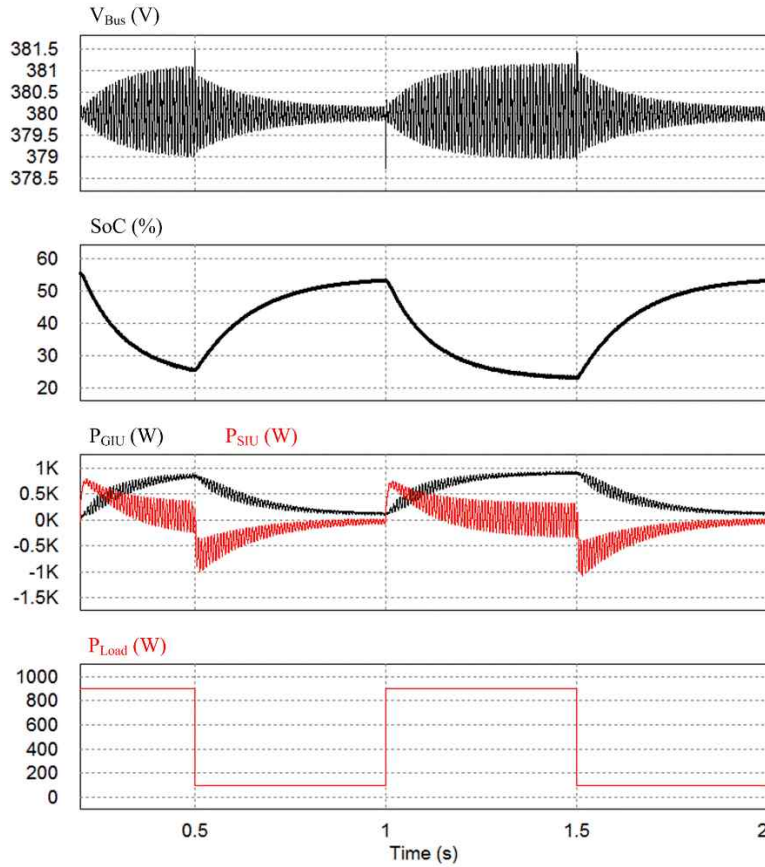


그림 4.34 주기적 부하 변동에 대한 모의 실험 결과 (2)

실제 부하 및 PV의 생산 프로파일에 맞춰 시스템의 동작을 확인하기 위해서 그림 4.36의 일반 가정집의 에너지 사용 프로파일[107]과 1 kW급 태양광 패널의 발전 프로파일을 이용하여 모의 실험을 진행 한다. 해당 에너지 사용 프로파일은 Southern California Edison Co. (SCE)에서 제공하는 가정용 전기 계량 프로파일 값을 이용하여 선정하였다. 그림 4.35는 SCE에서 제공하는 데이터 중에 각 월별 1일의 데이터를 표기한 것이며, 이 중에서 평일 가정집의 에너지 사용 프로파일로 잘 알려진 것과 비슷한

5월의 데이터를 이용해 모의 실험을 진행한다. 해당 데이터는 최대 부하가 약 1 kW 근처에서 나타나기에 본 논문에서 모델링한 시스템에 사용하기에 가장 적합하다는 장점도 가지고 있다.

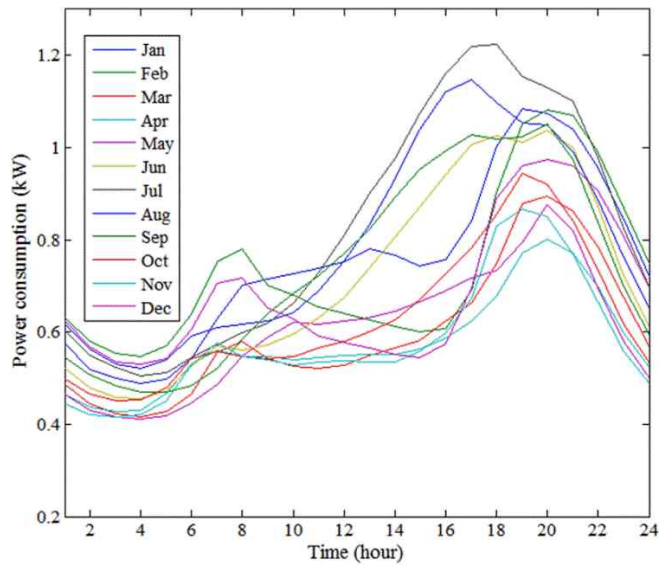


그림 4.35 각 월별 부하 프로파일

에너지 사용 프로파일은 24 h의 시간에 대한 값이지만, 24 h의 시간은 모의 실험 진행하기에 비현실적이기 때문에 이를 24 m로 축소시켜 모의 실험을 진행하도록 한다. 모의 실험의 시간을 줄이기 위해 **Average Switching Model**을 이용하더라도, SIU의 전류 제어 대역폭이 약 10 kHz에 달하기 때문에, 모의 실험을 위해서는 샘플링 주파수가 최소 20 kHz가 필요하며, 안정적인 결과를 얻기 위해서 약 50 kHz의 샘플링 주파수로 모의 실험을 진행하였고, 이를 24 h에 맞춰 진행하기에는 무리이기 때문에 시간의 축소가 필요하다. 이에 따라 시간 축을 줄인 프로파일에 맞춰 저장

장치의 변동 역시 확인하기 위해 저장 장치의 값 역시 축소 시켜야 하며, 이를 위해 배터리의 C_{bat} 값을 1/60배로 줄여서 프로파일에 따라 실제 SoC가 변동하는 것을 확인한다. 이때 내부 저항 값인 R_i 와 R_{diff} 는 용량이 아닌 SoC-OCV의 관계를 나타내는 수치이기 때문에 그대로 둔 상태로 모의 실험을 진행한다. 저장 장치 용량 축소에 맞춰 해당 값을 60배로 키울 경우, 배터리의 입 출력 전류에 의해 배터리 출력 단의 전압의 상승 혹은 감소 폭이 매우 크게 나타나, 실제 동작 범위에서 크게 벗어날 뿐만 아니라 심할 경우에는 SIU의 설계 동작 범위에서 벗어나게 되어 제어에 문제가 발생 할 수도 있다.

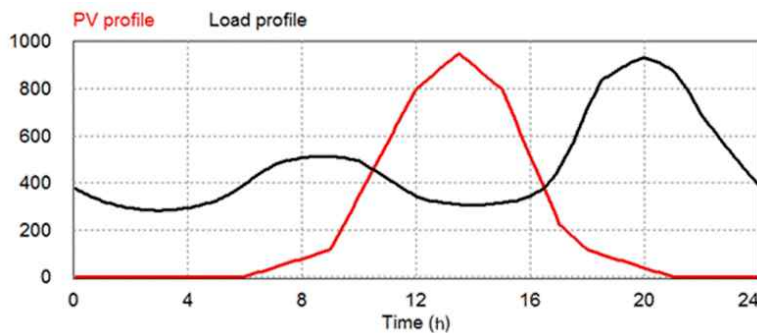


그림 4.36 모의 실험에 사용한 태양광 발전 프로파일 및 부하 프로파일

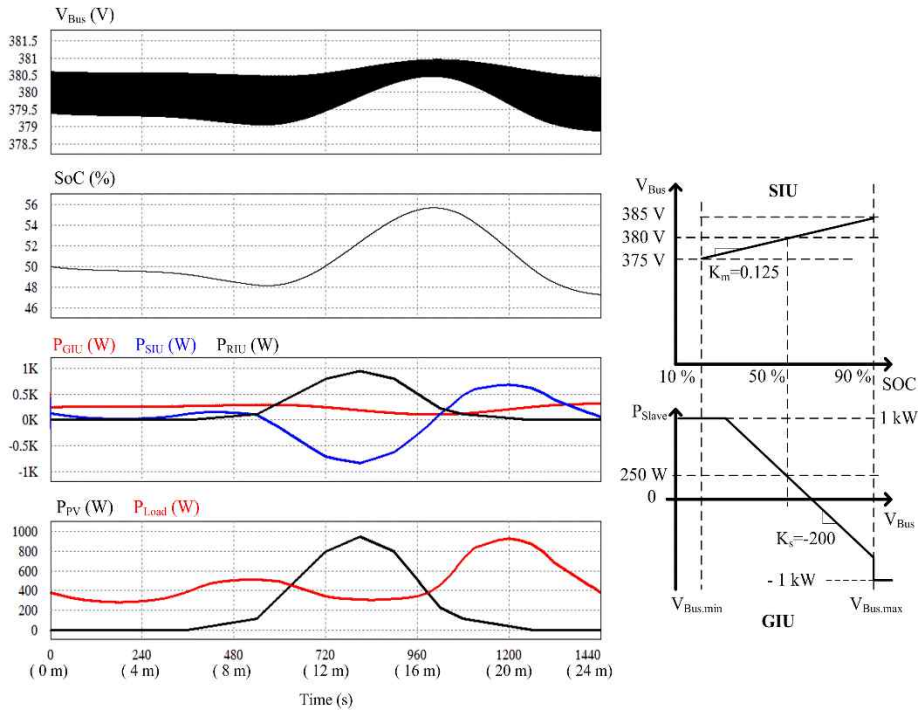


그림 4.37 실제 부하 및 신 재생 발전 프로파일에 따른 모의 실험 결과

그림 4.37은 K_s 를 -200으로 설정하고 외부 지령치로 부하의 하루 평균 소모량과 PV의 평균 발전량의 차인 250 W를 고정적으로 대입한 경우의 모의 실험 결과이다. GIU는 배전 선로 전압이 380 V일 경우 250 W를 전달하며, 부하가 이 250 W와 PV에서의 생산량보다 커질 경우 저장 장치에서 에너지를 추가 공급하면서 배전 선로 전압이 떨어지고, 이에 맞춰 GIU의 전달 에너지가 증가하여 저장 장치의 용량을 40~60% 이내의 범위에서 유지한다.

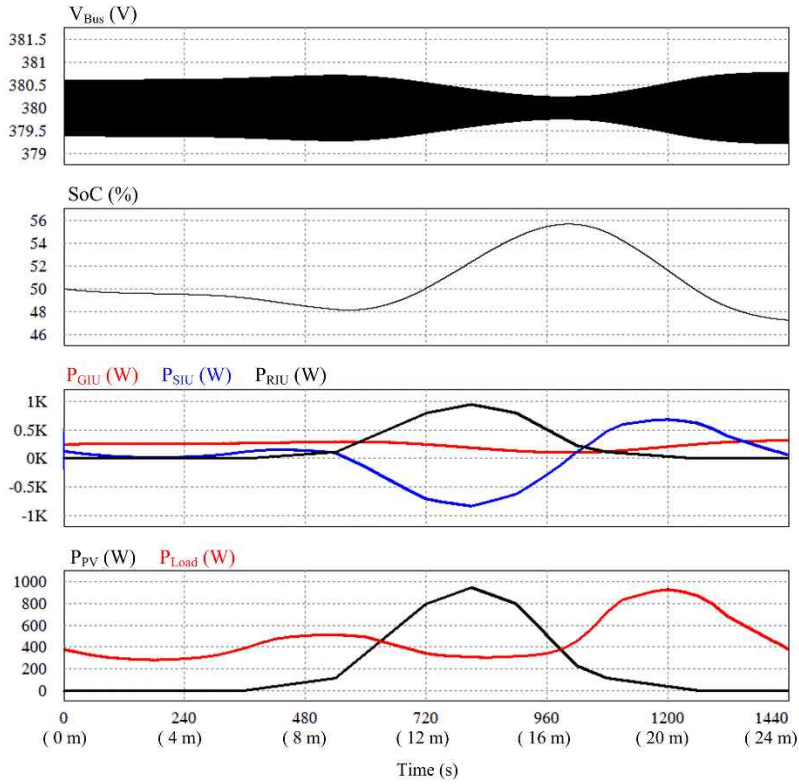


그림 4.38 전압 회복을 추가한 DBS 마스터-슬레이브 시스템의 모의 실험 동작

그림 4.38은 이전과 동일한 조건에, 외부 지령치로 전압 회복 기능을 추가한 경우에 대한 모의 실험 파형을 나타낸다. 배전 선로 전압이 380 V를 기준으로 유지되며, 다른 SoC 변동이나 각 하위 시스템들의 전력 분배는 이전과 동일하게 유지되고, 따라서 배전 선로 전압의 리플 역시 동일한 크기로 유지된다. 해당 전압 보상 방식은 부하 상태를 이용하는 것이 아닌 저장 장치의 상태 값을 기반으로 전압을 보상하기 때문에 외부 지령치의 갱신 속도가 매우 느리며 따라서 통신 지연 등에 대해 강인한

특성을 갖는다는 장점이 있다.

그림 4.39는 K_s 값에 따른 RIU, GIU 그리고 SIU의 전류 분배를 비교한 모의 실험 결과이다. 부하 프로파일과 태양광 발전 프로파일은 동일한 값을 사용하였으며, 슬레이브 커브의 DBS 이득인 K_s 값을 -200과 -800으로 각기 달리하였다. 동일한 조건임에도 K_s 값에 따라 전류 분배가 달라지며, 특히 큰 K_s 값을 사용할 경우 배전 선로 전압의 변화에 민감하게 GIU의 에너지 생산량이 변동하기 때문에 저장 장치에서 충전 및 방전하는 평균 에너지 양을 줄일 수 있다.

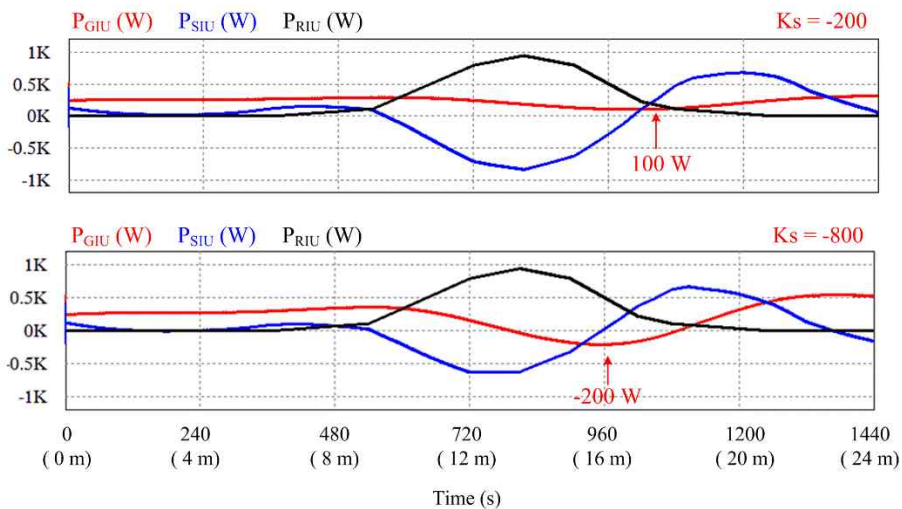


그림 4.39 K_s 값에 따른 전류 분배 비교

제 5 장 실험 및 결과

5.1 실험 세트 구성

본 장에서는 다중 전원이 연계된 직류 배전 시스템에서 제안한 제어 전략의 타당성 검증에 위해 하드웨어를 구현하고 실험을 통해 동작을 확인한다. 그림 5.1은 시스템의 구성을 나타낸 것으로 저장 장치와 태양광 시뮬레이터 그리고 교류 계통이 전력 변환 회로를 통해 직류 배전 선로에 병렬로 연결된다. 각 전력 변환 회로와 분산 전원들의 세부 구성은 표 5.1과 같다.

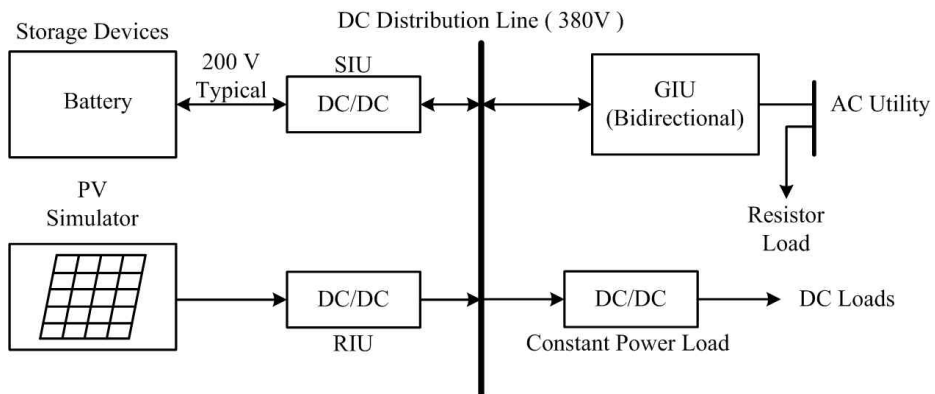


그림 5.1 실험 세트 구성 블록도

표 5.1 실험 세트 장비 구성

	품명	정격
PV Simulator	TerraSAS / BOB Enterprise	Open circuit voltage - 200 V Short circuit current - 5A

Battery	KBM216P / Kokam	4.2 V – 2.7 V, 31 Ah Li-Polymer Cell 56 series – 1 parallel 6kW
RIU	Boost Converter	$P_{\max} = 1 \text{ kW}$ $L_{\text{RIU}} = 1 \text{ mH}$, $f_{\text{sw}} = 50 \text{ kHz}$
SIU	Bi-directional Boost Converter	$P_{\max} = 1 \text{ kW}$ $L_{\text{SIU}} = 1 \text{ mH}$, $f_{\text{sw}} = 100 \text{ kHz}$, $C_o = 100 \mu\text{F}$
GIU	Bi-directional H-Bridge Converter	$P_{\max} = 1 \text{ kW}$ $L_{\text{GIU}} = 4 \text{ mH}$, $f_{\text{sw}} = 18 \text{ kHz}$, $C_o = 1 \text{ mH}$

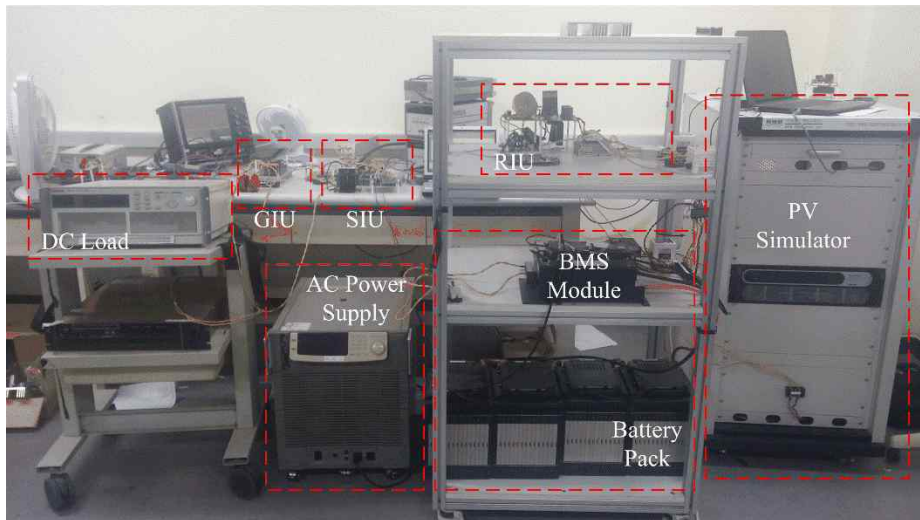


그림 5.2 실험 세트

그림 5.2는 실험에 사용된 각종 에너지원들과 실제 실험을 위해 제작된 시스템들이다. 외부 교류 계통은 파워 서플라이와 저항을 이용해 양방향 전력 전송이 가능하도록 구성하였으며, 태양광 패널을 대신하여 PV Simulator를 사용하여 시스템을 구성하였다.

5.2 통합 회로 동작

3장과 4장에서 개별 하위 시스템의 설계 및 모의 실험 결과를 확인했으며, 각 하위 시스템의 동작은 일반적인 PWM 동작 회로와 동일하므로 이에 대한 실험 결과는 생략하고 통합 회로 동작을 확인한다.

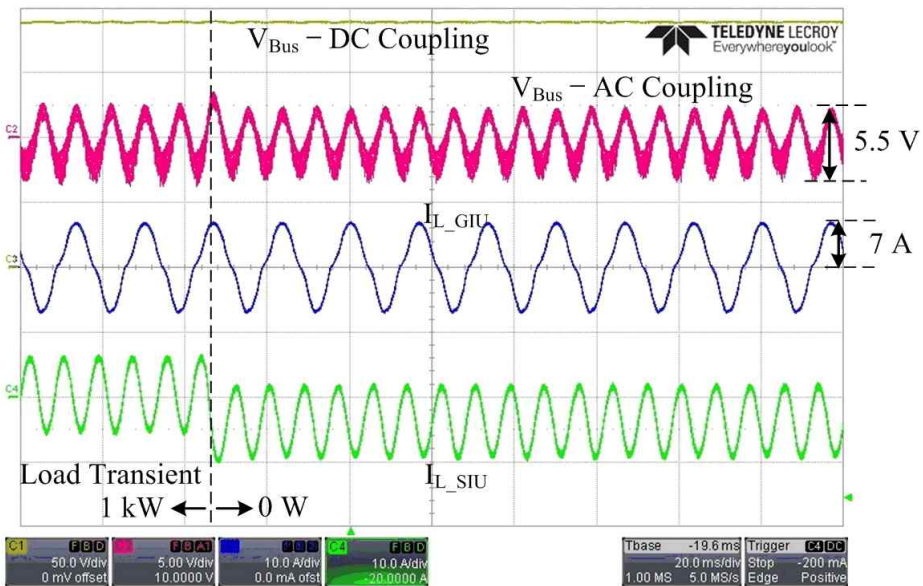


그림 5.3 부하 변동에 대한 통합 실험 결과

그림 5.3은 부하 변동 상태에 대한 통합 실험 결과이다. 점선으로 표시된 위치에서 부하를 1 kW \rightarrow 0 W로 변동시켰으며, 이에 따른 배전 선로 전압과 GIU, SIU의 인덕터 전류를 나타낸다. 제안한 DBS 마스터-슬레이브 제어에서 GIU의 전력 정보는 SoC 변동에 따른 배전 선로 전압에 의해 결정되므로, 부하 변동만을 이용해서는 GIU의 인덕터 전류는 변동되지 않는다. 따라서 SIU가 이에 대한 모든 제어를 담당하며 I_{L_SIU} 의

파형은 평균 값만 부하에 따라 변경되고 최대 전류 변동치는 그대로 유지된다.

I_{L_GU} 는 최대 배전 선로 전압 리플 값을 확인하기 위해 최대 발전량을 적용시켰으며, 이때 I_{L_GU} 의 최대 진폭은 약 7 A이며, 이는 그림 5.4에 표시된 마스터-슬레이브 제어 시 배전 선로 임피던스 커브에 맞춰 감쇄되어 버스 전압 리플으로 반영된다. 마스터-슬레이브 제어 시 120 Hz 지점에서의 임피던스는 -2.21 dB이며, 이로 인해 약 0.78배로 감쇄된 5.5 V 리플이 배전 선로에 발생한다. 이는 기존 드롭 제어의 2.7 dB에 비하면 약 40% 이상 감소된 결과이다.

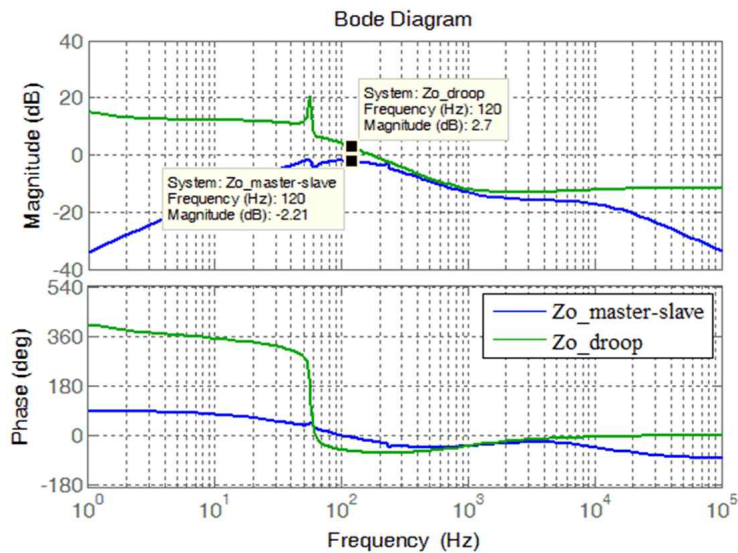


그림 5.4 DBS마스터-슬레이브 제어 시 배전 선로 임피던스

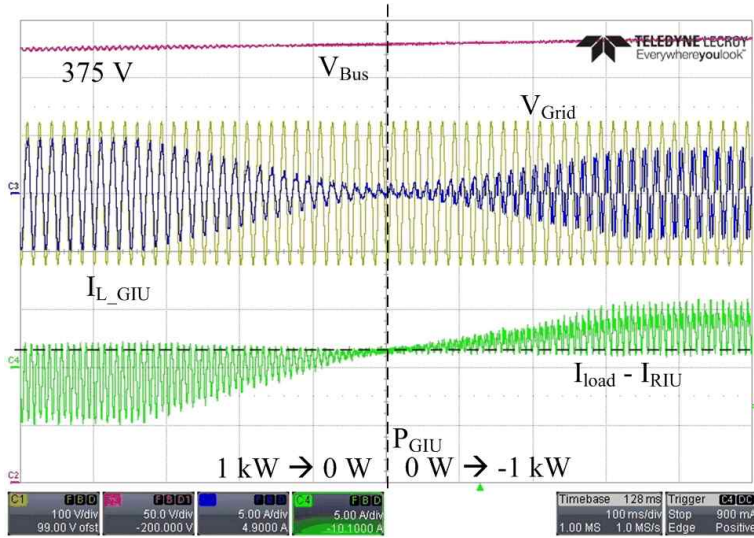


그림 5.5 SoC 변동에 대한 실험 결과

그림 5.5는 DBS 마스터-슬레이브 제어를 적용한 시스템에 저장 장치의 SoC를 10% → 90%로 점진적으로 변화시킨 경우 SIU와 GIU, 그리고 배전 선로의 전압을 실험으로 검증한 결과이다. 사용한 저장 장치의 경우 용량적인 문제로 인해 실제 실험에서 SoC의 변동에 시간이 너무 오래 걸리기 때문에 외부에서 강제적으로 SoC 값에 변화를 주었다. 우선 배전 선로의 경우 기존에 설계 했던대로 SoC에 따라 375 V의 배전 선로 전압에서부터 385 V까지 점진적으로 변동하며, 이 값에 따라 GIU의 입력 전류가 8A 에서 -7A까지 줄어든다. 이에 따라 SIU의 입력 전류는 GIU에서 배전 선로로 전송하는 전류를 보상하기 위해 충전상태에서 방전상태로 변경되며, 이때 RIU의 발전량과 부하량이 변하지 않기 때문에 I_{L_SIU} 의 기준 축은 (부하량(I_{load}) - RIU 출력 전류(I_{RIU}))의 값으로 고정되어 유지된다.

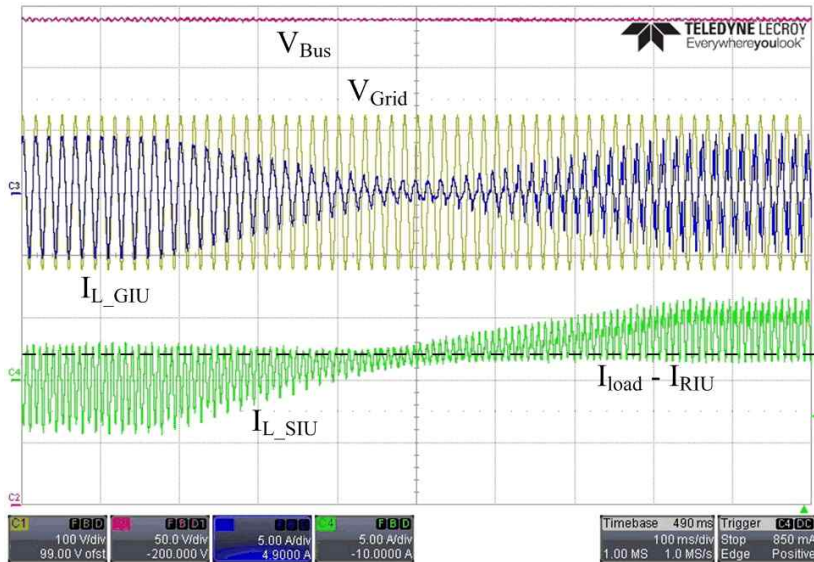


그림 5.6 전압 회복 기능이 포함된 경우 실험 결과

그림 5.6은 동일한 실험 조건에서 배전 선로 전압 회복 기법이 적용된 경우의 실험 결과이다. 다른 부분은 전부 동일하며, 배전 선로 전압만이 380 V로 일정하게 유지된다. SoC의 변경 속도가 매우 느리며, 이 실험 조건의 경우 SoC 변동을 점진적으로 이루기 때문에 배전 선로 전압의 유지가 간단하며, 통신 지연에 대해 강인한 특성을 가지고 있다.

그림 5.7은 부하 변동 이후 정상 상태 동작 시의 동작을 확인하기 위한 실험 파형이다. 기존 저장 장치 - 배터리 - 의 시정수가 너무 커서 실제 동작 변동을 확인 할 수 없기 때문에 저장 장치의 위치에 배터리를 제거하고 100 mF 크기의 전해 커패시터를 대용하여 실험을 진행하였다.

부하는 2 A → 0.5 A → 2A로 변동시켰으며, 이는 약 80 %, 20 % 부하 상태를 나타낸다. 앞서 언급한대로 순간 변동 시에는 SIU가 부하 변동에

따른 전압 제어를 담당하며, 이에 따라 저장 장치의 전압이 변경되고, GIU는 이에 맞춰 발전량을 조절한다. 시간 변동에 따라 이러한 변화는 포화상태에 도달하며, 최종적으로 SIU는 0 W를 생산하면서 배전 선로 품질만을 관리하는 Shunt Regulator와 같은 역할을 하게 되고, GIU가 평균 부하 에너지를 관리하는 형태를 띄게 된다는 사실을 실험을 통해 확인 할 수 있으며, 또한 부하가 어떠한 형태로 변한다 하더라도 저장 장치가 과 충전 혹은 과 방전 상태로 넘어가지 않고 시스템을 유지 할 수 있음을 확인 가능하다.

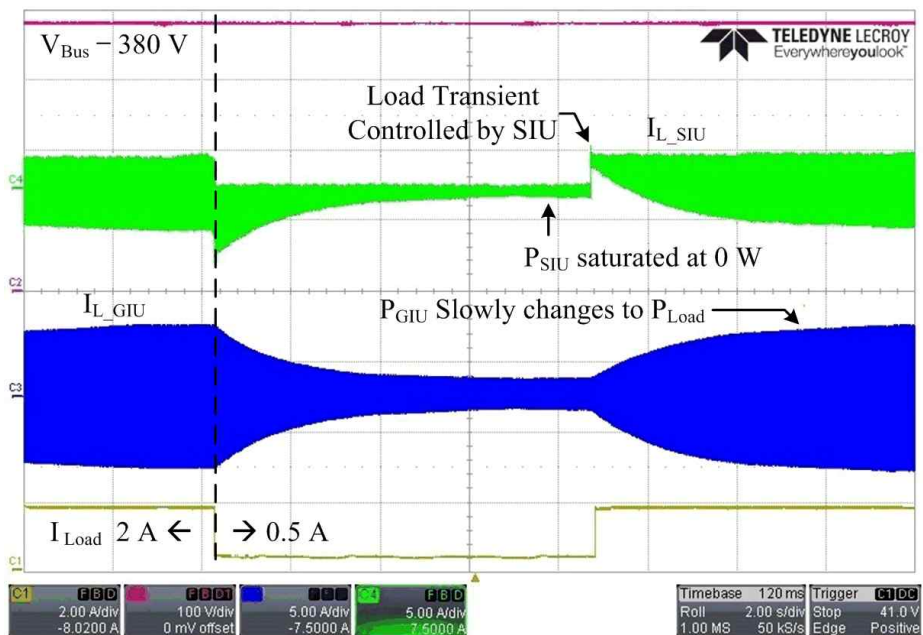


그림 5.7 장 시간 DBS 동작에 대한 실험 파형

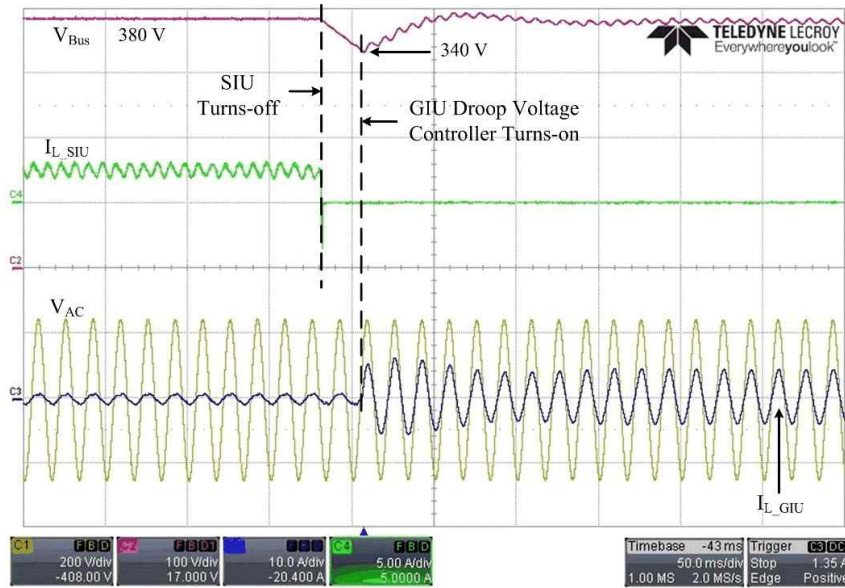


그림 5.8 마스터 사고 상황 시 동작 변환 실험 파형

그림 5.8은 마스터 사고 상황 시 동작을 확인하기 위한 실험 파형이다. 800 W 부하 상황에서 DBS 마스터-슬레이브 동작 중이던 시스템에서, 마스터인 SIU의 동작을 정지시켰을 경우 GIU의 동작을 확인한다. SIU의 동작이 정지되면서 배전 선로 전압이 미리 설정된 NDZ 범위를 벗어남에 따라, GIU의 제어 설계에서 미리 설정한 드롭 전압 제어기가 동작하게 되고, 마스터 없이 배전 선로 전압을 유지할 수 있음을 확인 가능하다.

제 6 장 결론 및 향후 과제

6.1 결론

본 논문에서는 신 재생 에너지원과 에너지 저장 장치가 포함된 직류 배전 시스템의 새로운 운용 방안 및 설계에 대해 살펴보았다. 제안한 운용 방안의 타당성을 확인하기 위해 기본적인 제어 알고리즘 및 소신호 분석을 바탕으로 한 설계 방식을 정리하였으며, 안정도 확인 및 제안한 운용 방안의 특징에 대해 논의하였다. 본 논문의 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫 번째로 마스터-슬레이브 제어 방식을 사용해 직류 배전 시스템을 동작시키는 방안을 제안하였다. 마스터-슬레이브 제어 방식은 드롭 제어와 같은 임피던스 제한 문제 및 이로 인한 시스템 설계 시 안정성에 대한 추가 고려가 필요 없다. 또한 배전 선로 임피던스가 드롭 제어를 사용한 경우에 비해 전체적으로 낮으며, 이 때문에 부하 변동 등의 외란에 대한 동특성이 빨라 배전 선로 전압을 더 안정적으로 유지 가능하다. 상시 전원이 아닌 저장 장치를 마스터로 하여 상대적으로 높은 제어 대역폭을 얻을 수 있고, 이를 통해 낮은 배전 선로 임피던스 설계가 가능하여, 기존 상시 전원을 마스터로 사용한 제어 방식에 비해 더욱 빠르고 안정적인 배전 선로 전압 제어를 가능토록 하였다.

두 번째로 기존 마스터-슬레이브 제어의 단점이었던 시스템 신뢰성을 향상시켰다. 기존 마스터-슬레이브 제어 방식은 필수적으로 추가 통신을

필요로 하였으며, 이때문에 통신의 단락 지연 등에 대해 취약한 단점을 가지고 있어 실제 적용에 문제점으로 지적되었다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 DBS 마스터-슬레이브 제어 방식을 제안하여 통신과 독립적으로 하위 시스템을 마스터-슬레이브 제어 할 수 있는 방법을 고안하였다. 해당 방식은 저장 장치의 에너지 저장 용량 지표인 SoC 값을 이용해 배전 선로의 전압을 변경시키며, 이를 통해 추가 통신 없이 슬레이브의 에너지 분배를 할 수 있으며, 이에 따라 마스터-슬레이브를 이용하여 배전 선로 임피던스를 줄이면서도 상위 제어기와 하위 제어기가 독립적으로 동작할 수 있도록 분리 가능한 시스템을 제안하였고, 표준화에 유리한 계층 구조 형태로 구성 할 수 있다.

또한 해당 제어 및 운용 방안의 동작 방식 및 추가 EMS 동작을 위한 방법을 확인하였으며, 이에 따른 시스템의 동작을 확인하였고, 이를 모의 실험과 하드웨어 제작을 통해 확인하였다.

6.2 향후 과제

직류 배전은 앞서 언급했듯이 여러 장점이 있기 때문에 높은 신뢰성을 필요로 하는 시스템 및 소규모 마이크로-그리드 시스템을 대상으로 점차 사용이 늘어날 것으로 예상된다. 하지만 직류 배전 시스템은 관심 및 연구의 진행 상황에 비해 아직 실제 설치 및 적용이 부족하기 때문에 명확한 규정들 역시 부족한 상황이다. 특히 정상 상태 배전 전압 규정 뿐만 아니라 각 사고 상황에 대한 규정 및 신뢰성 판별에 관련한 규정

역시 기존의 교류 시스템에 비해 아직 부족한 면이 많아 과한 설계가 진행되는 경향이 많다. 본 논문에서는 정해진 범위 내에서 각 전력 변환 회로를 설계하는 연구 및 동특성을 증가 시킬 수 있는 시스템 운용 방안에 대해 연구하였으며 이를 통해 배전 선로의 안정성 및 품질 향상을 목표하였다. 하지만 전체 시스템 측면에서의 안정성 및 신뢰성에 대한 부분은 다루어지지 않았으며 이와 관련된 여러 시스템 보호 관련된 연구들, 특히 각종 단락 사고에 대한 효율적인 대응 및 토폴로지 별 보호 방법 등에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 시스템 운용 방법에 대한 기본적인 개념에 대해 소개했지만 실제 부하 예측 및 오차 보상 등에 대한 상위 제어기의 상세한 분석 및 비교 역시 추가적으로 연구 가능한 부분이며 저장 장치에서 배터리와 슈퍼 커패시터 혼용 사용 과정 역시 용량 및 배터리 충전 전류 형상에 국한하지 않고 부피와 가격 등의 여러 요소를 추가로 신경 쓸 수 있는 부분으로 직류 배전 시스템의 적용 및 운용에 도움이 될 수 있으리라 생각한다.

참고문헌

- [1] J. M. Bloemink and T. C. Green, "Benefits of Distribution-Level Power Electronics for Supporting Distributed Generation Growth," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 911-919, Apr. 2013.
- [2] J. Driesen and F. Katiraei, "Design for distributed energy resources," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 3, pp. 30-40, 2008.
- [3] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D. Haeseleer, "Distributed generation : definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787-798, Apr. 2005.
- [4] R. H. Lasseter and P. Piagi, "Microgrid: A Conceptual Soution," in *2004 IEEE Power Electronic Specialist Conference*, Aachen, Germany, 2004, pp. 4285-4290.
- [5] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of Low-Voltage DC Microgrids," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3, pp. 1045-1053, Jun. 2009.
- [6] (2016, *Renewable 2016 Global Status Refort*.
- [7] J. M. Carrasco, *et al.*, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, Aug. 2006.
- [8] G. Wu, S. Kodama, Y. Ono, and Y. Monma, "A hybrid microgrid system including renewable power generations and energy storages for supplying

- both the DC and AC loads," in *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 1-5.
- [9] "Active Distribution System Management : A key tool for the smooth integration of distributed generation," Eurelectric, Ed., ed. Eurelectric, 2013.
 - [10] C. Blake, "Gridlock : How one small, community owned microhydro scheme exposed the inadequacy of our distribution grid that compromises our energy future.," RenewableUK., Ed., ed.
 - [11] L. Xiangjun, H. Dong, and L. Xiaokang, "Battery Energy Sotrage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 464-473, 2016.
 - [12] E. I. Vrettos and S. A. Papathanassiou, "Operating Policy and Optimal Sizing of a High Penetration RES-BESS System for Small isolated Grids," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 744-756, 2011.
 - [13] X. Guoyi, X. Lie Xu, and D. J. Morrow, "Coordinated DC Voltage Control of Wind Turbine with Embedded Energy Sotrage System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 1036-1045, 2012.
 - [14] S. Teleke, M. E. Baran, and S. Bhattacharya, "Rule-Based Control of Battery Energy Sotrage for Dispatching Intermittent Renewable Sources," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 117-124, 2010.
 - [15] J. M. Guerrero, H. Lijun, and J. Uceda, "Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems," *Industrial Electronics, IEEE*

- Transactions on*, vol. 55, no. 8, pp. 2845-2859, Aug. 2008.
- [16] D. Heng, R. Oruganti, and D. Srinivasan, "Modeling and Control of Single-Phase UPS Inverters: A Survey," in *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*, 2005, pp. 848-853.
 - [17] Z. Biao, S. Qiang, L. Wenhua, and X. Yi, "Next-Generation Multi-Functional Modular Intelligent UPS System for Smart Grid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 9, pp. 3602-3618, May. 2013.
 - [18] P. Karlsson, "DC Distributed Power Systems," Ph. D. Dissertation, Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Univ., 2002.
 - [19] D. J. Hammerstrom, "AC Versus DC Distribution Systems Did We Get it Right?," in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 2007, pp. 1-5.
 - [20] M. E. Baran and N. R. Mahajan, "DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 6, pp. 1596-1601, Nov. 2003.
 - [21] P. Huey, E. Lo, and B. Pong, "DC Electrical Distribution Systems in Buildings," in *Power Electronics Systems and Applications, 2006. ICPESA '06. 2nd International Conference on*, 2006, pp. 115-119.
 - [22] A. Pratt, P. Kumar, and T. V. Aldridge, "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," in *Proc. Telecommunications Energy Conference, 2007. INTELEC 2007. 29th International*, 2007, pp. 32-39.

- [23] B. C. Wang, M. Sechilariu, and F. Locment, "Intelligent DC Microgrid with Smart Grid Communications: Control Strategy Consideration and Design," *IEEE Transactions on Smartgrid*, vol. 3, no. 4, pp. 2148-2156, 2012.
- [24] K. Engelen, *et al.*, "The Feasibility of Small-Scale Residential DC Distribution Systems," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 2618-2623.
- [25] A. Sannino, G. Postiglione, and M. H. J. Bollen, "Feasibility of a DC network for commercial facilities," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 5, pp. 1499-1507, Sep. 2003.
- [26] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, and R. Uchida, "DC Voltage Control of the DC Micro-grid for Super High Quality Distribution," in *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, 2007, pp. 518-525.
- [27] A. Mansoor, C. Gellings, D. Rastler, and D. V. Dollen, "DC Power Production, Delivery and Utilization," EPRI, Ed., ed, 2006.
- [28] G.-S. Seo, J. Baek, K. Choi, H. Bae, and B. Cho, "Modeling and analysis of DC distribution systems," in *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*, 2011, pp. 223-227.
- [29] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and R. Teodorescu, "Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids; a general approach towards standardization," in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, 2009, pp. 4305-4310.
- [30] *Public Overview of the EMerge Alliance Data/Telecom Center Standard*

(Version 1.0 ed.). Available:

<http://www.emergealliance.org/Standards/DataTelecom/RequestStandard.aspx>

- [31] M. Caserza Magro, A. Mariscotti, and P. Pinceti, "Definition of Power Quality Indices for DC Low Voltage Distribution Networks," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006. IMTC 2006. Proceedings of the IEEE*, 2006, pp. 1885-1888.
- [32] M. D. Nimrihter, D. I. Banjai, and R. M. Ciric, "Power quality indices of distribution networks. Definitions and evaluation," in *International Conference on Electric Power Engineering, 1999. PowerTech Budapest 99. , 1999*, p. 288.
- [33] P. Kundur, J. Paserba, and S. Vitet, "Overview on definition and classification of power system stability," in *Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003. CIGRE/PES 2003. CIGRE/IEEE PES International Symposium*, 2003, pp. 1-4.
- [34] A. Radwan and Y. Mohamed, "Modeling, Analysis, and Stabilization of Converter-Fed AC Microgrids With High Penetration of Converter-Interfaced Loads," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 1213-1225, Aug. 2012.
- [35] P. Kundur, *et al.*, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.

- [36] D. Bo, L. Yongdong, and Z. Zhixue, "Control strategies of DC-bus voltage in islanded operation of microgrid," in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, 2011, pp. 1671-1674.
- [37] M. H. Ashourian, A. A. M. Zin, A. S. Mokhtar, S. J. Mirazimi, and Z. Muda, "Controlling and modeling power-electronic interface DERs in islanding mode operation micro grid," in *Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2011 IEEE Symposium on*, 2011, pp. 161-166.
- [38] G.-S. Seo, "Study on Series Arc Fault Detection for DC Microgrids," Ph. D., Electrical Engineering, Seoul National Univ., 2015.
- [39] H. Chaoyong, H. Xuehao, and H. Dong, "Hierarchical control techniques applied in micro-grid," in *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-5.
- [40] S. Grillo, V. Musolino, G. Sulligoi, and E. Tironi, "Stability Enhancement in DC Distribution Systems with Constant Power Controlled Converters," in *2012 IEEE 15th International Conferences on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2012, pp. 848-854.
- [41] X. Ji, L. Yanjun, and W. Wei, "Stability Analysis of DC Microgrids with Cooperative Droop Control," in *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, Chengdu, China, 2016, pp. 9963-9968.
- [42] M. Rodriguez, G. Stahl, L. Corradini, and D. Maksimovic, "Smart DC Power Management System Based on Software-Configurable Power Modules,"

- IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1571-1586, Apr. 2013.
- [43] J. Beerten, R. Eriksson, and R. Belmans, "Influence of DC Voltage Droop Settings on AC System Stability," in *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)*, 2012.
 - [44] Q. Xu, *et al.*, "Design and stability Analysis for an Autonomous DC Microgrid with Constant Power Load," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2016, pp. 3409-3415.
 - [45] L. Meng, T. Dragicevic, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Stability Constrained Efficiency Optimization for Droop Controlled DC-DC Conversion System," in *Industrial Electronics Society, IECON 2013*, 2013, pp. 7222-7227.
 - [46] F. Chen, R. Burgos, and D. Boroyevich, "Output Impedance Comparison of Different Droop Control Realizations in DC Systems," in *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2016.
 - [47] T. F. Wu, C. L. Kuo, K. H. Sun, and G. R. Yu, "DC-bus voltage regulation with bi-directional inverter in DC distribution systems," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE*, 2012, pp. 769-774.
 - [48] T.-F. Wu, C.-L. Kuo, L.-C. Lin, and Y.-K. Chen, "DC-Bus Voltage Regulation for a DC Distribution System with a Single-Phase Bi-directional Inverter,"

- Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.
- [49] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010.
 - [50] B. M. M. Mwinyiwiwa, "DC Bus Voltage Regulator for Renewable Energy Based Microgrid Application," *International Journal of Electrical, Computer, Electornics and Communication Engineering*, vol. 7, pp. 1139-1143, Nov. 2013.
 - [51] C. Xin, Z. Qing-Chang, and M. Wen-Long, "Ripple Eliminator to Smooth DC-Bus Voltage and Reduce the Total Capacitance Required," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 4, pp. 2224-2235, Apr. 2015.
 - [52] F. Chen, R. Burgos, D. Boroyevich, and W. Zhang, "A Nonlinear Droop Method to Improve Voltage REgulation and Load Sharing in DC Systems," in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2015.
 - [53] D. dong, "Ac-dc Bus-interface Bi-directional Converters in Renewable Energy Systems," Ph. D Dissertation, Electrical Engineering, Virginia Polytech., 2012.
 - [54] B. H. Cho and F. C. Lee, "Modeling and analysis of spacecraft power systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 1, pp. 44-54, Jan. 1988.

- [55] H. Phuong and B. H. Cho, "A new methodology for the stability analysis of large-scale power electronics systems," *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 4, pp. 377-385, Apr. 1998.
- [56] S. Thale, V. Agarwal, and K. Unni, "CAN based control of DC-DC converters in distributed generation units operating in master slave configuration," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
- [57] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou, "Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 1, pp. 241-248, Mar. 2008.
- [58] J. Rajagopalan, K. Xing, Y. Guo, F. C. Lee, and B. Manners, "Modeling and dynamic analysis of paralleled DC/DC converters with master-slave current sharing control," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual*, 1996, pp. 678-684 vol.2.
- [59] L. Shiguo, Y. Zhihong, L. Ray-Lee, and F. C. Lee, "A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules," in *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, 1999, pp. 901-908.
- [60] V. Verma and G. G. Talpur, "Decentralized Master-Slave operation of microgrid using current controlled distributed generation sources," in *Power*

Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference on, 2012, pp. 1-6.

- [61] N. Eghtedarpour and E. Farjah, "Distributed charge/discharge control of energy storages in a renewable-energy-based DC micro-grid," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 8, no. 1, pp. 45-57, Jan. 2014.
- [62] B. K. Johnson, R. H. Lasseter, F. L. Alvarado, and R. Adapa, "Expandable multiterminal DC systems based on voltage droop," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 4, pp. 1926-1932, Oct. 1993.
- [63] J.-W. Kim, "Configuration and Control Method of Modular Converter Schemes for Distributed Power System," Ph. D., Electrical Engineering, Seoul National Univ., 2001.
- [64] P. Karlsson and J. Svensson, "DC bus voltage control for a distributed power system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 6, pp. 1405-1412, 2003.
- [65] J. K. Schonberger, "Distributed Control of a Nanogrid Using DC Bus Signaling," Ph. D., Electrical and Electornic Engineering, University of Canterbury, 2005.
- [66] C. Gavriluta, J. I. Candela, J. Rocabert, A. Luna, and P. Roderiquez, "Adaptive Droop for Control of Multiterminal DC Bus Integrating Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 16-24, Feb, 2015 2015.
- [67] M. Martino, Y. F. Quinones, P. Raboni, and C. Zhe, "Intelligent control for a

- DC micro-grid system," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International*, 2012, pp. 1-5.
- [68] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.
- [69] E. Barklund, N. Pogaku, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 2346-2352, Sep. 2008.
- [70] R. C. Dugan, T. E. McDermott, and G. J. Ball. (2001, Aug.) Planning for distributed generation. *Industry Applications Magazine, IEEE*. 80-88.
- [71] J. Baek, "Control and Stability Analysis of the DC Distribution System including Renewable ENergy Sources and ENergy Storage Systems," Ph. D, Electrical Engineering, Seoul National Univ., 2014.
- [72] F. Shahnia, "Impact of Low Pass Filters of the Droop Control on Converter-Interfaced DERs of an Islanded Microgrid," presented at the 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Taipei, 2016.
- [73] D. Qu, M. Wang, Z. Sun, and G. Chen, "An Improved DC-Bus Signaling Control Method in a Distributed Nanogrid Interfacing Modular Converters," in *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2015, pp. 214-218.
- [74] J. Schonberger, R. Duke, and S. D. Round, "DC-Bus Signaling : A

- Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, Oct. 2006.
- [75] S.-W. Lee and B.-H. Cho, "Master-Slave Based Hierarchical Control for a Small Power DC-Distributed Microgrid System with a Storage Device," *Energies*, vol. 9, no. 11, pp. 1-14, 27, Oct, 2016 2016.
- [76] C. Y. Chun, G. S. Seo, and B. H. Cho, "Current Sensor-less State-of-Charge Estimation Algorithm for Lithium-Ion Batteries Utilizing Filtered Terminal Voltage," *Journal of Power Sources*, vol. 273, pp. 255-263, 2015.
- [77] C. Y. Chun, "Current Sensor-less Battery Internal State Estimation Using Cell Voltage," Doctor, Department of Electrical Engineering, Seoul National University, 2016.
- [78] G. B. Ingale, S. Padhee, and U. C. Pati, "Design of Stand Alone PV System for DC-Micro Grid," in *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, Nagercoil, 2016, pp. 775-780.
- [79] H. A. Sher, A. F. Murtaza, K. E. Addoweesh, and M. Chiaberge, "An Intelligent Off-Line MPPT Technique for PV Applications," presented at the 2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC), Kuala Lumpur, 2013.
- [80] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview," in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 2007, pp. 1-5.
- [81] L. Baoquan, Z. Fang, Z. Yixin, and Y. Hao, "System Operation and Energy

- Management of a Renewable Energy-Based DC Micro-Grid for High Penetration Depth Application," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 1147-1155, May. 2015.
- [82] S.-R. Nam, S.-H. Kang, J.-H. Lee, E.-J. Choi, S.-J. Ahn, and J.-H. Choi, "EMS-Data-Based Load Modeling to Evaluate the Effect of Conservation Voltage Reduction at a National Level," *Energies*, vol. 6, no. 8, 2013.
- [83] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 1, pp. 46-54, Aug. 2001.
- [84] H. L. Chan, "A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 470-475 vol.1.
- [85] C. Liang-Rui, "Design of Duty-Varied Voltage Pulse Charger for Improving Li-Ion Battery-Charging Response," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 2, pp. 480-487, Feb. 2009.
- [86] T. K. Cheung, K. W. E. Cheng, H. L. Chan, Y. L. Ho, H. S. Chung, and K. P. Tai, "Maintenance techniques for rechargeable battery using pulse charging," in *Power Electronics Systems and Applications, 2006. ICPESA '06. 2nd International Conference on*, 2006, pp. 205-208.
- [87] M. Uno and K. Tanaka, "Influence of High-Frequency Charge-Discharge Cycling Induced by Cell Voltage Equalizers on the Life Performance of

- Lithium-Ion Cells," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 4, pp. 1505-1515, May. 2011.
- [88] S. Bala, T. Tengner, P. Rosenfeld, and F. Delince, "The effect of low frequency current ripple on the performance of a Lithium Iron Phosphate (LFP) battery energy storage system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, 2012, pp. 3485-3492.
 - [89] T.-H. Kim, *et al.*, "Analytical study on low-frequency ripple effect of battery charging," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE*, 2012, pp. 809-811.
 - [90] L. Xiao, *et al.*, "Power Management Unit With Its Control for a Three-Phase Fuel Cell Power System Without Large Electrolytic Capacitors," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 12, pp. 3766-3777, Dec. 2011.
 - [91] R. W. Ericson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics.," in *Fundamentals of Power Electronics.*, ed: KLUWERACADEMIC, 2001.
 - [92] R. D. Middlebrook, "Small-signal modeling of pulse-width modulated switched-mode power converters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 4, pp. 343-354, Apr. 1988.
 - [93] C. L. Phillips and H. T. Nagel, *Digital Control System Analysis and Design 4th Edition*: Prentice Hall Press Uper Saddle River, NJ, USA, 2007.
 - [94] M. Belkhatat, R. Cooley, and A. Witulski, "Large signal stability criteria for distributed systems with constant power loads," in *Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE*, 1995,

pp. 1333-1338 vol.2.

- [95] F. Xiaogang, Y. Zhihong, X. Kun, F. C. Lee, and D. Borojevic, "Impedance specification and impedance improvement for DC distributed power system," in *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, 1999, pp. 889-894 vol.2.
- [96] S. D. Sudhoff, S. F. Glover, P. T. Lamm, D. H. Schmucker, and D. E. Delisle, "Admittance space stability analysis of power electronic systems," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 3, pp. 965-973, Jul. 2000.
- [97] S. D. Sudhoff and S. F. Glover, "Three-dimensional stability analysis of DC power electronics based systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual*, 2000, pp. 101-106 vol.1.
- [98] "International Standard IEC 60287-2-1, Electric Cables - Calculation of the cable - Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - General."
- [99] "IEEE Std 835-1994 Standard Power Cable Ampacity Tables."
."
- [100] A. B. Jusoh, "The instability effect of constant power loads," in *Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National*, 2004, pp. 175-179.
- [101] M. Srinivasan and A. Kwasinski, "Decentralized control of a vehicular

- microgrid with constant power loads," in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International*, 2014, pp. 1-8.
- [102] H. J. Kim, "Large Signal Stability Analysis and Active Damping Control for Voltage Stabilization in DC Power System," Ph. D., Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, 2016.
- [103] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2346-2352, Sep. 2008.
- [104] A. Doloara, F. Grimaccia, G. Magistrati, and G. Marchegiani, "Optimal Management Algorithm for Battery Energy Storage System Included in an Islanded Micro-Grid," in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2016.
- [105] N. Tiwari and L. Srivastava, "Generation Scheduling and Micro-Grid Energy Management Using Differential Evolution Algorithm," in *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2016.
- [106] J. Queiroz, P. Leita, and A. Dias, "Predictive Data Analysis Driven Multi-Agent System Approach for Electrical Micro Grids Management," in *2016 IEEE 25th international Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2016, pp. 738-743.
- [107] (2016, *SCE Dynamic Load Profiles - DOM-S/M*. Available:

https://www.sce.com/wps/portal/home/regulatory/load-profiles/dynamic-load-profiles/!ut/p/b1/jZBPU8IwEMU_C4ce22wpFPWWsUxpBRXUMeTCBEjTaEg6aaQjn97IcJHx3972ze_tvnmIloKoZnspmJNGM_W503RVFhmO80G_yEdlBvg-G2VPizQe3MQeWWhoAfhgMf_nLfzo29n1TCDaMFeHulcGEWXYNmysqaTiLSLbd812chN-IZ8RPV6_zGE8Ke-gyB_nCRTJHG4fME4A0hPwS3yfTyizPlaxxHqdXPggllfcchu9WS_XzjXtVQABdF0XCWoe4tHGRK82gO9MtWkdIucsanbkMJ3Ay1Dtpxj3eh9nGk1V/dl4/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/

Abstract

Master–Slave Based Hierarchical Control for a Single Phase Grid Connected DC Distributed System with an ESS

SeungWoon Lee

Department of Electrical and Computer Engineering

Seoul National University

Technological development and environmental protection concerns have led to the introduction of distributed energy resources (DERs)—such as gas- and wind-turbines and photovoltaic (PV) energy source—into microgrids. Furthermore, the growth of PV into the most popular renewable energy source, as a result of its installation convenience, has helped to further the concept of the (DC) distribution system. Not only do such systems bring the advantages of PV-to-DC grid energy conversion efficiency, but they also allow for the utilization of storage devices and digital loads. For these reasons, DC microgrids have been studied under various application scenarios in an effort to find more efficient functionalities, structures, and control strategies.

As the technique for interfacing multiple energy sources at a DC distribution bus, the droop-based control method is widely used for energy management and bus voltage

control. Droop controls have many advantages, including communication independency and expandability, therefore, they can be widely used in microgrid environments requiring stable and reliable control. However, these benefits come at the cost of decreased bus quality owing to voltage regulation and transient response on the bus and, accordingly, incur high bus impedance. These problems may result in difficulties of overall system optimization in terms of efficiency and stability.

Master–slave controls have many advantages in terms of bus quality and control, but face a critical drawback in terms of a communication link requirement. A conventional master–slave control depends on the power sharing and control ability of a communication link, and thus needs a high-speed communication link to a control system simultaneously. Moreover, any communication delay or omission can reduce bus quality and system stability in general.

This paper proposes a novel master–slave control method that eliminates the need for a communication link. The proposed system utilizes the DC bus signaling (DBS) method to replace additional communication, and controls the input power of device-stored energy instead of a load condition. A detailed concept, analysis, and design consideration are presented, and a 380 V, 1 kW simulation under a Powersim (PSIM) environment and hardware prototype were built to verify the suitability of the proposed system. This system is intended for use in DC home applications such as net zero energy houses or nanogrid systems. Although the system has a small power capacity, it has the similar structure as a large-scale microgrid system, allowing for simplified system analysis and verification. As bus voltage regulation is more difficult with a single-phase

power factor correction (PFC) circuit, thus such a circuit is used here to demonstrate the effectiveness of the proposed control method.

Keywords : DC distribution system, Renewable energy sources, Energy storage devices, Distributed generation system, Small-signal analysis, Master-slave control

Student Number : 2008-22948